

GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE VÓRTICES ÓPTICOS MEDIANTE MODULADORES ESPACIALES DE LUZ

Trabajo de grado

Santiago Echeverri Chacón

Director: René Restrepo Gómez

Co-director: Luciano A Ángel Toro

Universidad EAFIT

11 de junio de 2015

Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Caracterización de un modulador espacial de luz de transmisión
 - Caracterización de la modulación de amplitud
 - Caracterización de la modulación de fase
- Resultados experimentales

3 Caracterización de aberraciones de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Aberraciones simuladas
- Aberraciones experimentales
- Propuesta de una aplicación para metroología

4 Conclusiones y trabajo futuro

5 Bibliografía

Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Caracterización de un modulador espacial de luz de transmisión
 - Caracterización de la modulación de amplitud
 - Caracterización de la modulación de fase
- Resultados experimentales

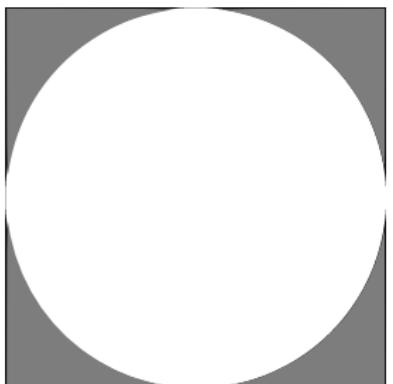
3 Caracterización de aberraciones de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Aberraciones simuladas
- Aberraciones experimentales
- Propuesta de una aplicación para metroología

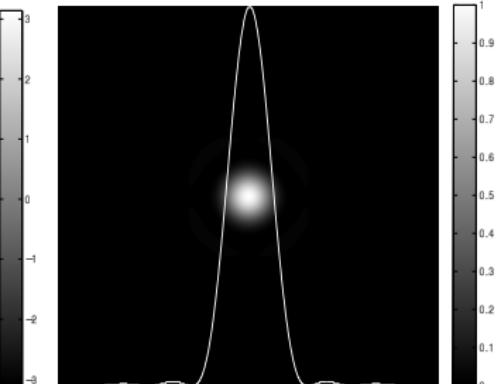
4 Conclusiones y trabajo futuro

5 Bibliografía

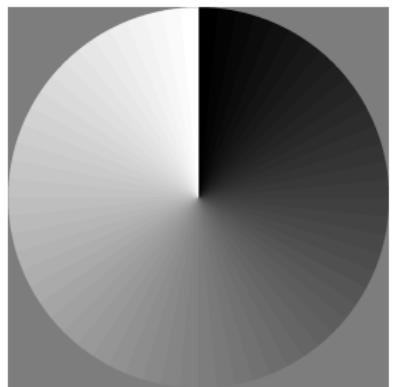
Planteamiento del problema



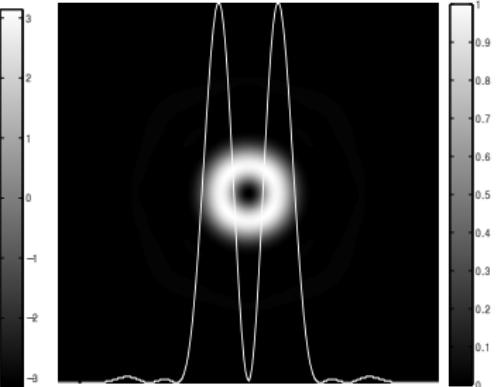
a)



c)

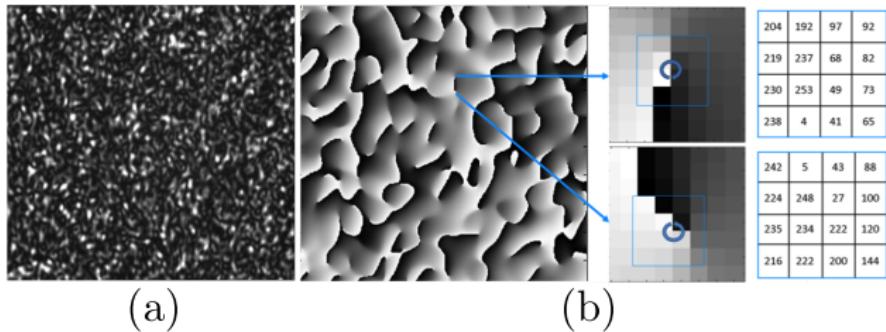


b)



d)

Planteamiento del problema

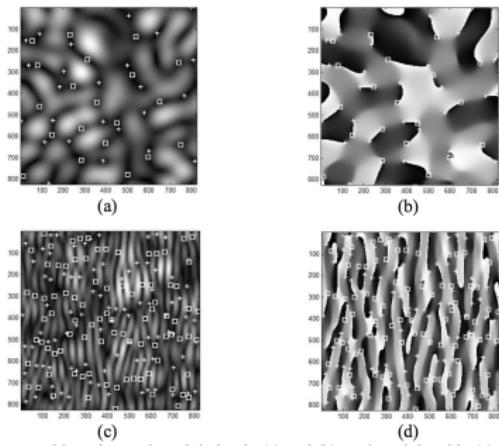


Effect of the internal modulation of speckles in displacement measurements in optical vortex metrology

Daniel Gomez-Tejada ; Daniel Sierra-Sosa ; Román Castañeda ; Luciano Angel-Toro

[+] Author Affiliations

Proc. SPIE 8785, 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications, 87858C (November 18, 2013); doi:10.1117/12.2026469



Planteamiento del problema

Novel vortex-transform for high frequency modulated patterns

Daniel Sierra-Sosa,^{1,2,*} Luciano Angel-Toro,² Nestor Bolognini,¹ and Myrian Tebaldi¹

¹Centro de Investigaciones Ópticas, CIOP (CONICET, CIC) and OPTIMO (Dpto. Ciencias Básicas, Facultad Ingeniería, UNLP), P. O. Box 3, (1897), M.B. Gonnet, Argentina

²Grupo de Óptica Aplicada, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad EAFIT, Medellin, Colombia

*dsierras@ciop.unlp.edu.ar

J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis. 2013 Mar 1;30(3):462-9. doi: 10.1364/JOSAA.30.000462.

In-plane displacement measurement in vortex metrology by synthetic network correlation fringes.

Angel-Toro L¹, Sierra-Sosa D, Tebaldi M, Bolognini N.

Speckle decorrelation influence on measurements quality in vortex metrology

Luciano Angel-Toro^a,  , Daniel Sierra-Sosa^{a,b}, Myrian Tebaldi^b, Néstor Bolognini^{b,c}

Effect of the internal modulation of speckles in displacement measurements in optical vortex metrology

Daniel Gomez-Tejada ; Daniel Sierra-Sosa ; Román Castañeda ; Luciano Angel-Toro

[+] Author Affiliations

Proc. SPIE 8785, 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications, 8785BC (November 18, 2013); doi:10.1117/12.2026469

Appl Opt. 2012 Oct 20;51(30):7411-9. doi: 10.1364/AO.51.007411.

Vortex metrology using Fourier analysis techniques: vortex networks correlation fringes.

Angel-Toro L¹, Sierra-Sosa D, Tebaldi M, Bolognini N.

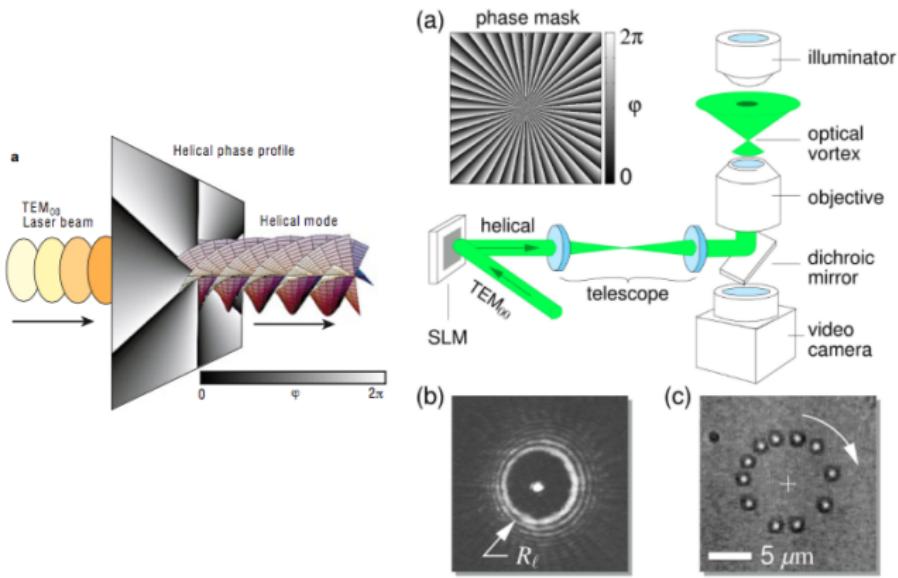
Aplicaciones de frentes de onda con vorticidad óptica

Modulated optical vortices

Jennifer E. Curtis and David G. Grier

Author Affiliations ▾ Find other works by these authors ▾

Optics Letters Vol. 28, Issue 11, pp. 872-874 (2003) doi: 10.1364/OL.28.000872



Aplicaciones de frentes de onda con vorticidad óptica

Shadow Effects in Spiral Phase Contrast Microscopy

Alexander Jesacher, Severin Fürhapter, Stefan Bernet, and Monika Ritsch-Marte

Division of Biomedical Physics, Medical University of Innsbruck, Müllerstr. 44, A-6020 Innsbruck, Austria
(Received 17 December 2004; revised manuscript received 15 March 2005; published 15 June 2005)

Recently it has been demonstrated that spatial filtering of images in microscopy with a spiral phase element in a Fourier plane of the optical path results in a strong edge enhancement of object structures. In principle the operation is isotropic, i.e., all phase edges of a sample object are highlighted simultaneously, independent of their local direction. However, here we demonstrate that the symmetry can be broken intentionally by controlling the phase of the central area of a spiral phase hologram, which is displayed at a computer controlled spatial light modulator. This produces an apparent shadow effect which can be rotated at video rate. The resulting relieflike impression of the sample topography with a longitudinal resolution in the subwavelength regime is demonstrated by imaging a standard low contrast test sample consisting of a human cheek cell.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.233902

PACS numbers: 42.30.Kq, 42.30.Va, 42.40.Eq

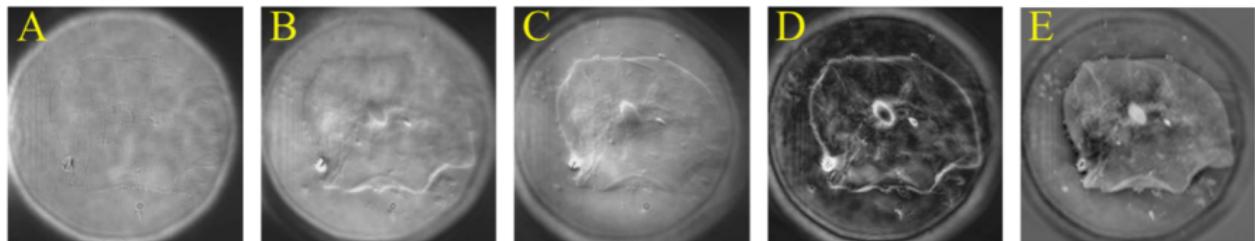
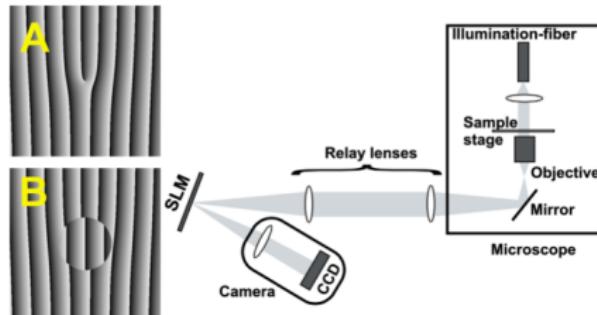


FIG. 3 (color online). Imaging of a human cheek cell. The image diameter is $\sim 50 \mu\text{m}$. (a) Bright-field image. (b) Resulting image after spatial filtering of the original image wave with the symmetry-breaking spiral phase hologram shown in Fig. 2(b). (c) Same spiral-filtering method as in (b), however, the phase of the central blazed grating is offset by π . (d) Absolute value of the complex image composed of 12 shadow effect images recorded with a phase offset of $2\pi/12$ from exposure to exposure. (e) Two-dimensional Hilbert back transform applied to image (d), looking similar as phase contrast microscopy, however with enhanced resolution.

Aplicaciones de frentes de onda con vorticidad óptica

NATURE PHOTONICS | ARTICLE

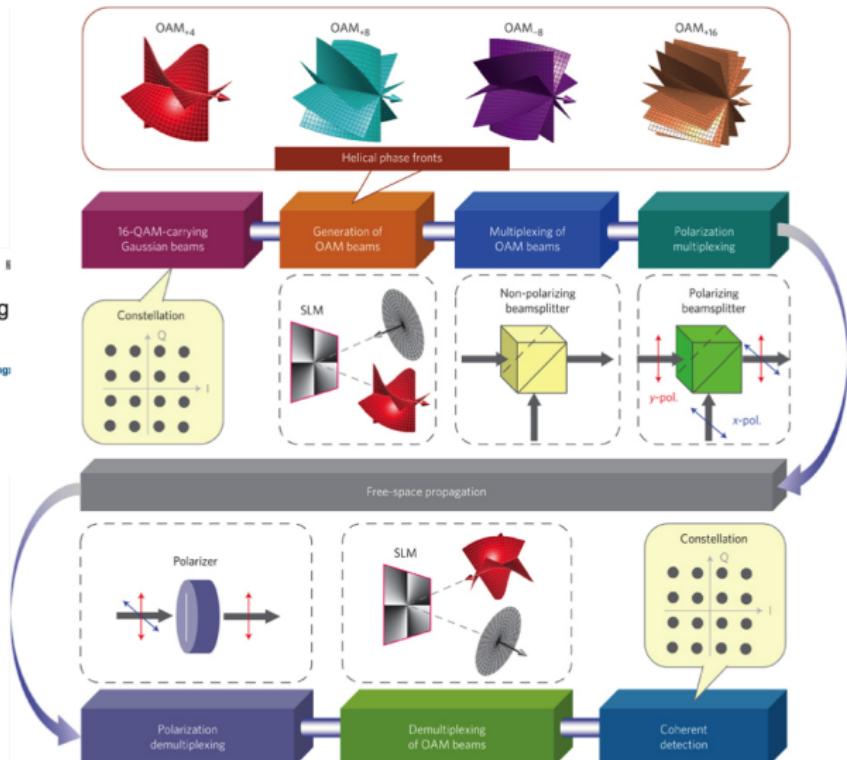
Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing

Jian Wang, Jeng-Yuan Yang, Irfan M. Fazal, Nisar Ahmed, Yan Yan, Hao Huang, Yong Ren, Yang Yue, Samuel Dolinar, Moshe Tur & Alan E. Willner

Affiliations | Contributions | Corresponding authors

Nature Photonics 6, 488–496 (2012) | doi:10.1038/nphoton.2012.138

Received 26 January 2012 | Accepted 14 May 2012 | Published online 24 June 2012



Objetivos planteados en el anteproyecto

Objetivo general

Desarrollar la capacidad para generar y caracterizar vórtices de fase mediante un modulador espacial de luz (SLM) de transmisión.

Objetivos específicos

- ① Identificar y apropiar los conceptos y procedimientos necesarios para caracterizar moduladores espaciales de luz de transmisión, con miras a la producción y análisis de vórtices ópticos (VOs).
- ② Implementar una plataforma experimental para caracterizar la modulación de amplitud y fase de un SLM a partir de un montaje interferométrico automatizado.
- ③ Obtener experimentalmente vórtices ópticos del tipo Laguerre-Gauss mediante el uso de un SLM y estudiar las distribuciones de intensidad y fase alrededor de los vórtices.
- ④ Proponer alternativas para el desarrollo de aplicaciones metrológicas basadas en la generación de VOs y el estudio de sus propiedades.

Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Caracterización de un modulador espacial de luz de transmisión
 - Caracterización de la modulación de amplitud
 - Caracterización de la modulación de fase
- Resultados experimentales

3 Caracterización de aberraciones de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Aberraciones simuladas
- Aberraciones experimentales
- Propuesta de una aplicación para metroología

4 Conclusiones y trabajo futuro

5 Bibliografía

Vórtices ópticos presentes en haces Laguerre-Gauss

Los haces Laguerre-Gauss son una solución a la ecuación de onda

$$u(r, \phi, z) \propto \frac{z_R}{(z_R^2 + z_R^2)} \left[\frac{r\sqrt{2}}{w(z)} \right]^l L_p^l \left(\frac{2r^2}{w^2(z)} \right) \exp \left(\frac{-r^2}{w^2(z)} \right)$$
$$\times \exp \left(\frac{-ikr^2 z}{2(z^2 + z_R^2)} \right) \exp(-il\phi) \exp \left[i(2p + l + 1) \tan^{-1} \frac{z}{z_R} \right]$$

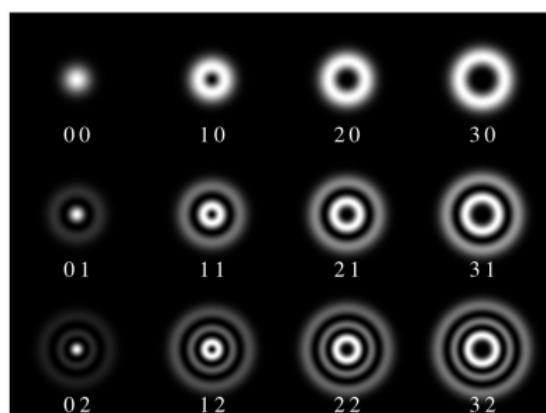


Imagen con licencia CC-BY-SA-3.0
tomada de Wikimedia, autor original Ziofil.

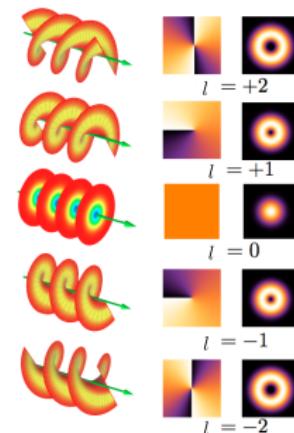


Imagen con licencia CC-BY-SA-3.0
tomada de Wikimedia, autor original E-karimi.

Cómo se generan los vórtices ópticos

Conversores modales

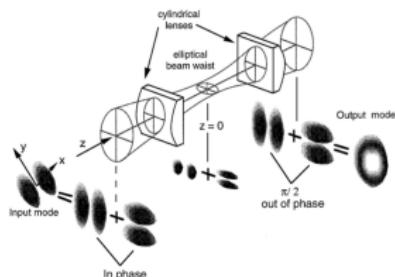


Figure 3. The cylindrical lens mode converter for the conversion of a Hermite-Gaussian $n = l, m = 0$ mode into the corresponding Laguerre-Gaussian mode with $l = 1$ and $m = 0$. The lenses of focal length f are separated by $1/2f^2$, where the Rayleigh range of the input beam is $(1 + 1/2)f$.

TUTORIAL REVIEW

The angular momentum of light: optical spinners and the rotational frequency shift

M. J. PADGETT, L. ALLEN
The School of Physics and Astronomy, The University of St Andrews, Fife, UK

Placas de fase espiral (SPP)

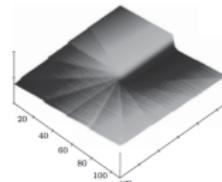


Fig. 2. AFM image of the spiral phase plate near to its central region.

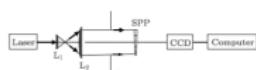


Fig. 3. Experimental setup for evaluating the spiral phase plate to generate optical vortex.

Hologramas de amplitud o fase del tipo espiral o tenedor

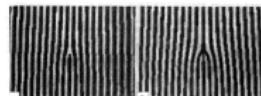


FIG. 1. a-The hologram which was synthesized in order to produce beams with a first-order diffraction; b-the same, for a second-order diffraction.

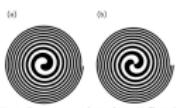
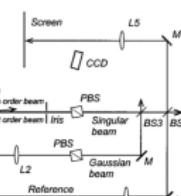


Fig. 1. Computer-generated zone plates. (a) Charge 1.
(b) Charge 2.



Topological charge and angular momentum of light beams carrying optical vortices

M. S. Soskin, V. N. Gorshkov, and M. V. Vasnetsov

Institute of Physics, National Academy of Sciences of the Ukraine, Kiev 252650, Ukraine

J. T. Malos and N. R. Heckenberg

Department of Physics, University of Queensland, Brisbane 4072, Australia

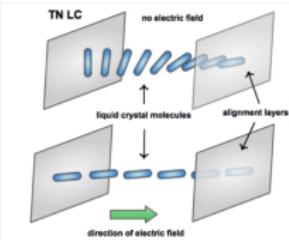
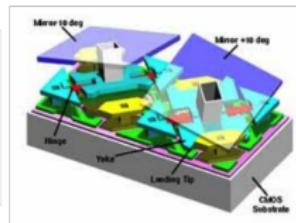
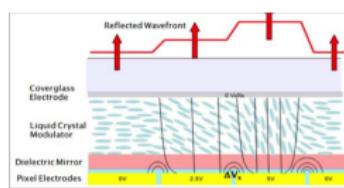
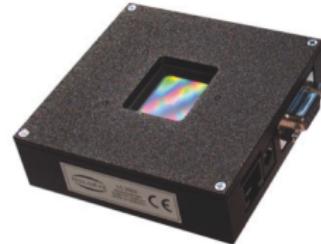
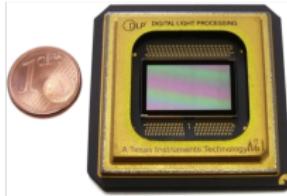
Generation of Optical Vortex Using a Spiral Phase Plate Fabricated in Quartz Direct Laser Writing and Inductively Coupled Plasma Etching

CHEN Jun(陈军)^{1,2}, KUANG Deng-Feng(匡登峰)^{1,*}, GUI Min(桂敏)¹, FANG Zhi-Liang(方志良)¹
¹The Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology, Institute of Modern Optics (Ministry of Education), Nankai University, Tianjin 300071

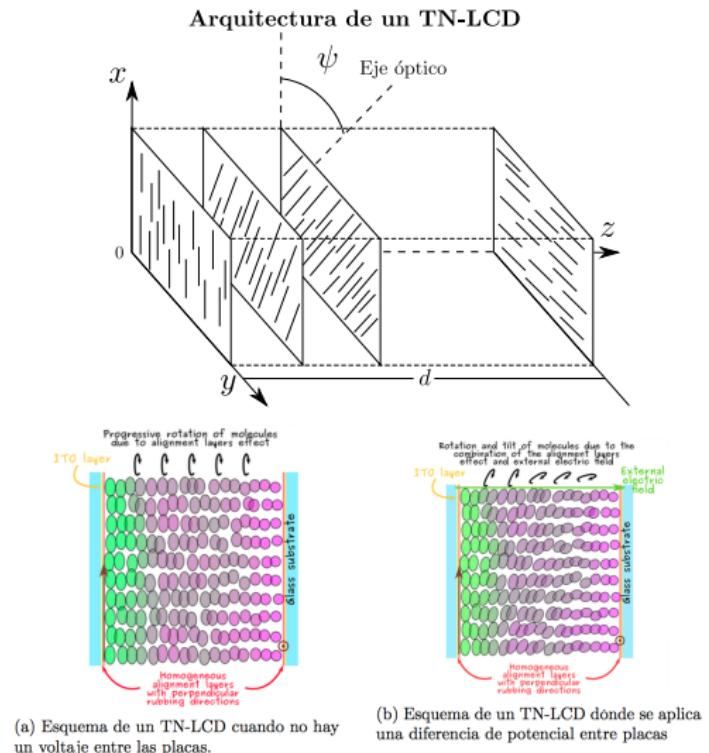
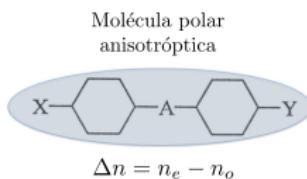
²Department of Physics, Taiyuan University, Taiyuan 271021

UNIVERSIDAD
EAFIT

Moduladores espaciales de luz

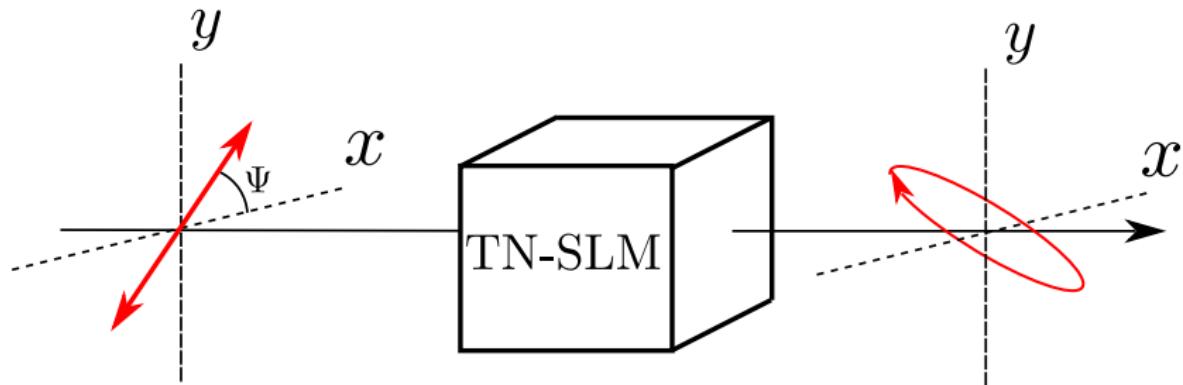


Cristales líquidos del tipo twisted nematic

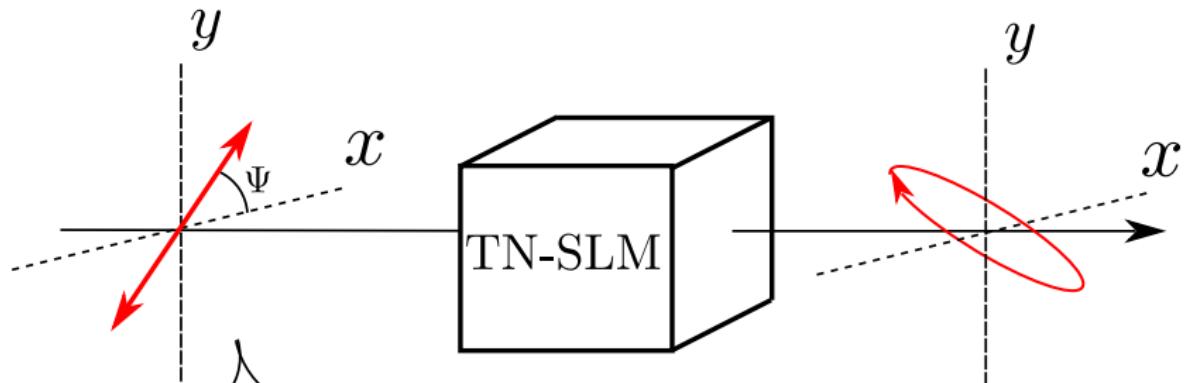


Tomado de Nestor Uribe [1] con autorización.

El modulador espacial de luz es un sistema que modifica la polarización



El modulador espacial de luz es un sistema que modifica la polarización



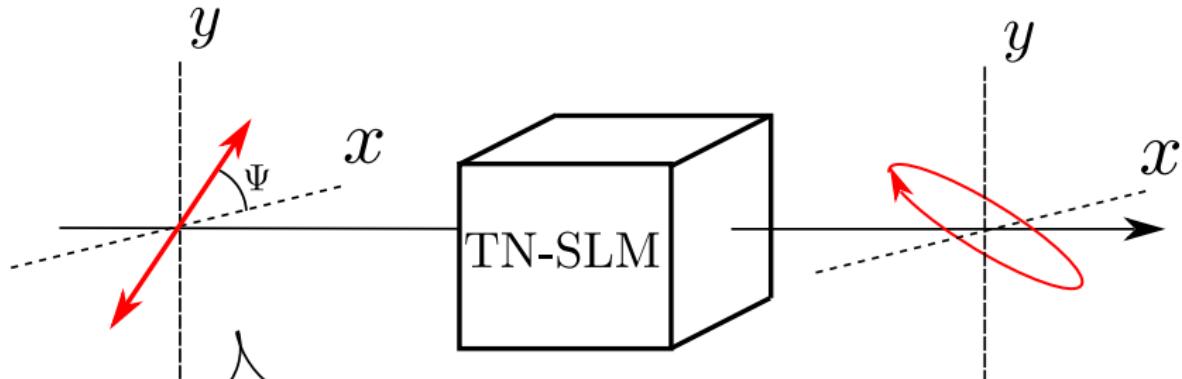
$$\mathbf{E} = E_x + E_y,$$

$$E_x = A_x \cos(\omega t - kz + \delta_x),$$

$$E_y = A_y \cos(\omega t - kz + \delta_y).$$

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} A_x e^{i\delta_x} \\ A_y e^{i\delta_y} \end{pmatrix}$$

El modulador espacial de luz es un sistema que modifica la polarización



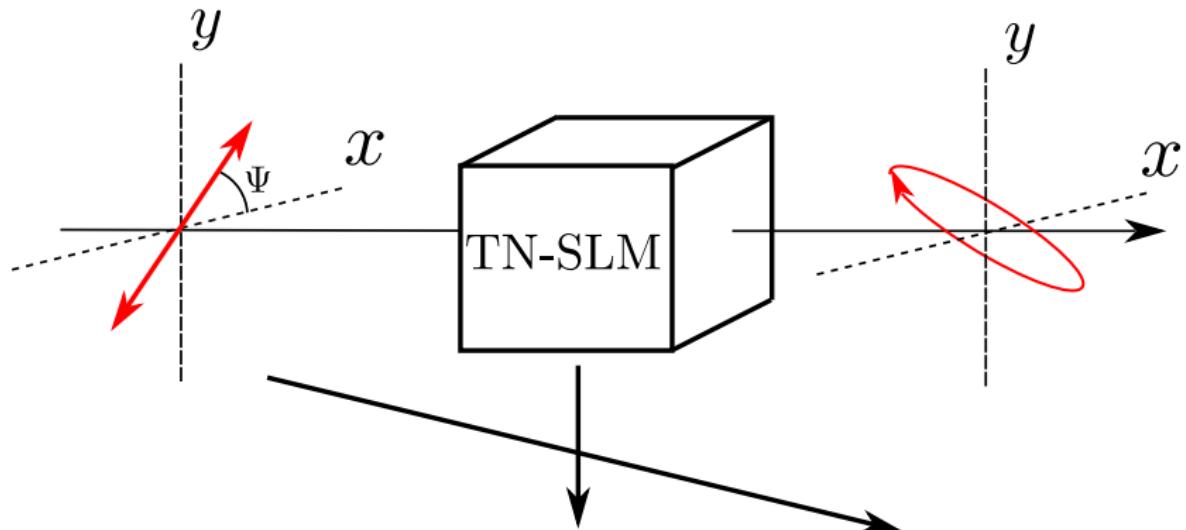
$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$45^\circ = \begin{pmatrix} \cos \pi/4 \\ \sin \pi/4 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad -45^\circ = \begin{pmatrix} \cos -\pi/4 \\ \sin -\pi/4 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{CD} = \begin{pmatrix} \cos \pi/4 \\ \sin \pi/4 e^{i\frac{\pi}{2}} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}, \quad \mathbf{CI} = \begin{pmatrix} \cos -\pi/4 \\ \sin -\pi/4 e^{i\frac{\pi}{2}} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}.$$

El modulador espacial de luz es un sistema que modifica la polarización



$$\mathbf{J}_{\text{out}} = \begin{pmatrix} A_x e^{i\delta_x} \\ A_y e^{i\delta_y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X + iY & Z + iW \\ -Z + iW & X - iY \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$X^2 + Y^2 + Z^2 + W^2 = 1.$$

Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Caracterización de un modulador espacial de luz de transmisión
 - Caracterización de la modulación de amplitud
 - Caracterización de la modulación de fase
- Resultados experimentales

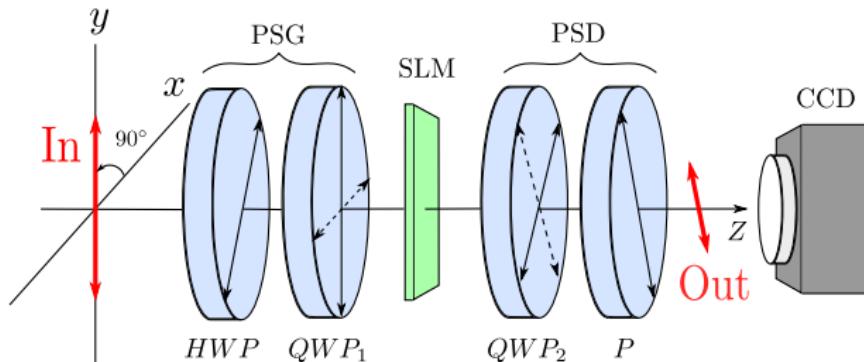
3 Caracterización de aberraciones de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Aberraciones simuladas
- Aberraciones experimentales
- Propuesta de una aplicación para metroología

4 Conclusiones y trabajo futuro

5 Bibliografía

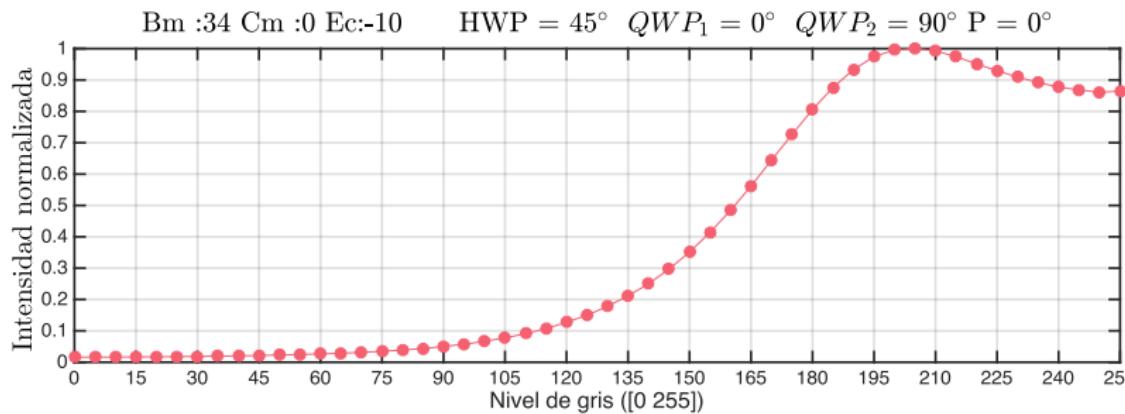
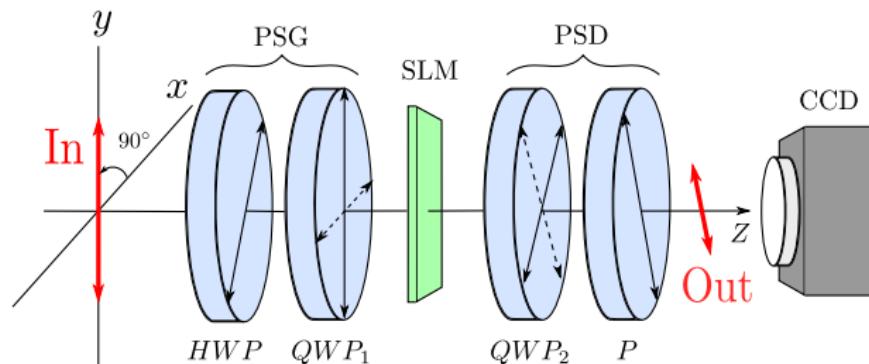
Medida de la modulación de amplitud del SLM



$$J_{Out} = \underbrace{(\mathbf{P} \ QWP_2 \) \ SLM \ (\mathbf{QWP}_1 \ HWP)}_{|J\rangle = \begin{pmatrix} J_x \\ J_y \end{pmatrix}} J_{In} \underbrace{\rangle}_{= (\mathbf{QWP}_1 \ HWP) \ J_{In}}$$

$$\begin{aligned} I &= |\langle J | \mathbf{SLM} | J \rangle|^2 \\ &= \left| \begin{pmatrix} J_x & J_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X + iY & Z + iW \\ -Z + iW & X - iY \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_x \\ J_y \end{pmatrix} \right|^2 \end{aligned}$$

Medida de la modulación de amplitud del SLM



El método de Ma et al. para la caracterización del SLM

JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 107, 073107 (2010)

Prediction of optical modulation properties of twisted-nematic liquid-crystal display by improved measurement of Jones matrix

Baiheng Ma,^{1,2} Baoli Yao,^{1,a)} Tong Ye,¹ and Ming Lei³

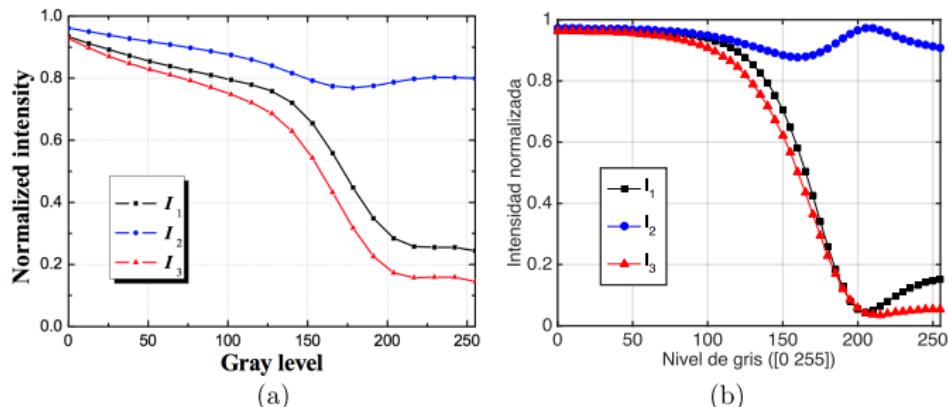
¹Sauvage Key Laboratory of Functional Optics and Photonics, Wuhan Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 71011, China

²Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

³College of Life Science and Shannxi Key Laboratory of Molecular Biology for Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 712100, People's Republic of China

1. Medir

$$I_1 = |\langle \mathbf{H} | SLM | \mathbf{H} \rangle|^2, \quad I_2 = |\langle \mathbf{CD} | SLM | \mathbf{CD} \rangle|^2, \quad I_3 = |\langle 45^\circ | SLM | 45^\circ \rangle|^2,$$
$$I_1^\perp = |\langle \mathbf{V} | SLM | \mathbf{H} \rangle|^2, \quad I_2^\perp = |\langle \mathbf{CI} | SLM | \mathbf{CD} \rangle|^2, \quad I_3^\perp = |\langle -45^\circ | SLM | 45^\circ \rangle|^2$$



El método de Ma et al. para la caracterización del SLM

JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 107, 073107 (2010)

Prediction of optical modulation properties of twisted-nematic liquid-crystal display by improved measurement of Jones matrix

Baiheng Ma,^{1,2} Baoli Yao,^{1,a)} Tong Ye,¹ and Ming Lei³

¹Suzhou Key Laboratory of Functional Optics and Photonics, Wuhan Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xian 710116, China

²Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

³College of Life Science and Shanxi Key Laboratory of Molecular Biology for Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 712100, People's Republic of China

2. Despejar X^2 , Y^2 , Z^2 y W^2

$$I_1 = X^2 + Y^2,$$

$$I_2 = X^2 + Z^2,$$

$$I_3 = X^2 + W^2.$$

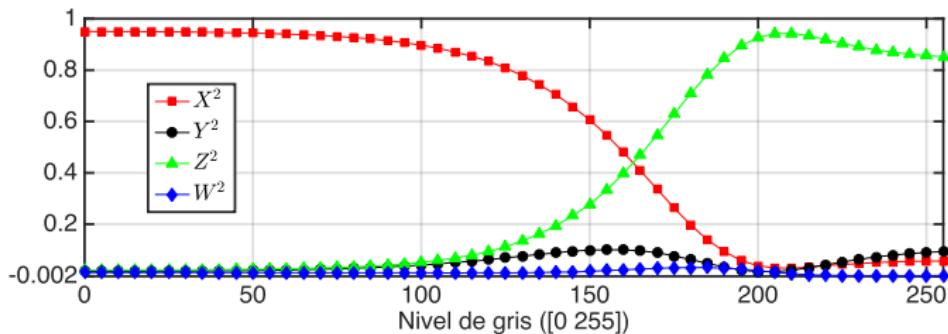
$$X^2 + Y^2 + Z^2 + W^2 = 1$$

$$X^2 = \frac{1}{2} (I_1 + I_2 + I_3 - 1),$$

$$Y^2 = \frac{1}{2} (I_1 - I_2 - I_3 + 1),$$

$$Z^2 = \frac{1}{2} (I_2 - I_1 - I_3 + 1),$$

$$W^2 = \frac{1}{2} (I_3 - I_1 - I_2 + 1).$$



El método de Ma et al. para la caracterización del SLM

JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 107, 073107 (2010)

Prediction of optical modulation properties of twisted-nematic liquid-crystal display by improved measurement of Jones matrix

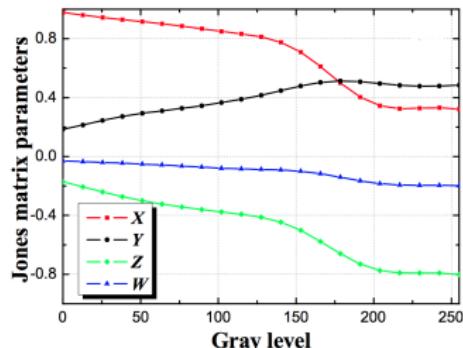
Baiheng Ma,^{1,2} Baoli Yao,^{1,a)} Tong Ye,¹ and Ming Lei³

¹Sino Key Laboratory of Twisted Optics and Photonics, Wuhan Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710116, China

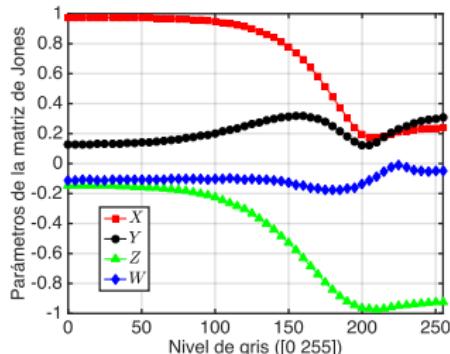
²Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

³College of Life Science and Shaanxi Key Laboratory of Molecular Biology for Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 721000, People's Republic of China

3. ¿Ajustar?



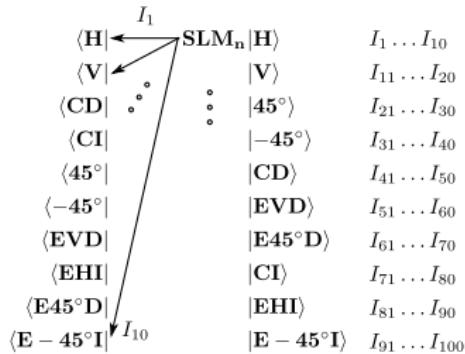
(a)



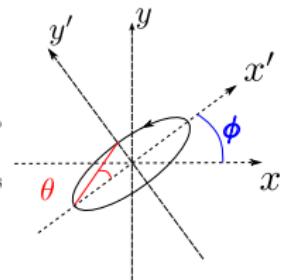
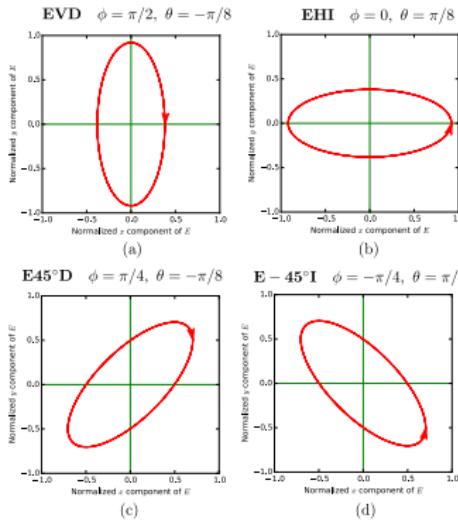
(b)

Comprobación experimental con 100 medidas

100 medidas nuevas



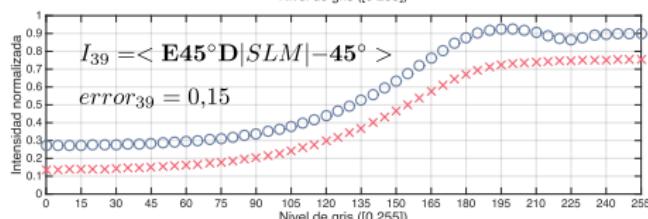
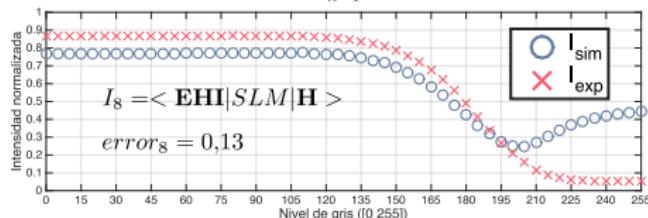
Requieren de cuatro estados nuevos



Resultados de la caracterización de amplitud con el método de Ma et al.

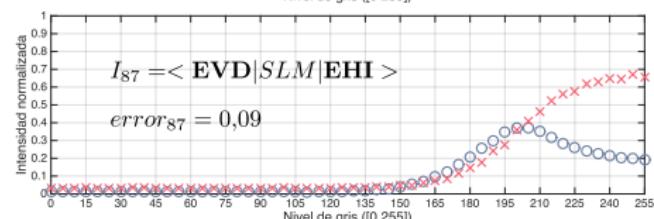
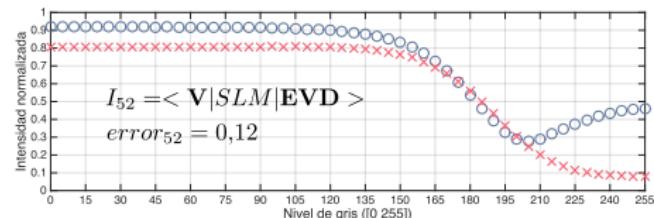
El error para cada estado se definió como:

$$error_i = \sum_{n=1}^{52} \frac{|I_n^e - I_n^s|}{52}$$



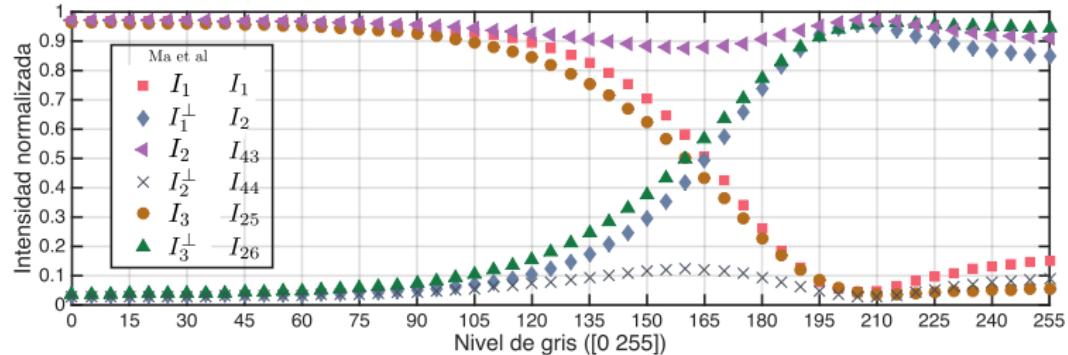
El error global del método fue de:

$$error_g = \sum_{i=1}^{100} \frac{error_i}{100} = 0,09$$



Un método nuevo basado en minimización de parámetros

1. Inicialmente se propusieron las mismas 6 medidas



2. Y los datos se usaron como función objetivo en un esquema de minimización

$$\mathcal{L}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{W}) = \sum_{ng=0}^{255} \sum_{i=1}^6 |I_{ng,i} - |\langle \mathbf{J}_i | \mathbf{SLM}_{ng} | \mathbf{J}_i \rangle|^2|^2$$

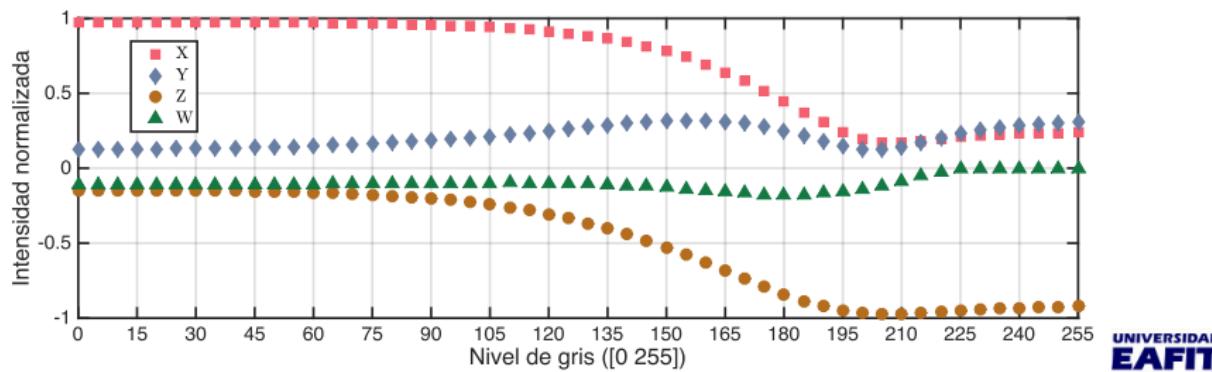
$$\mathbf{X} = \sum_{n=0}^{255} X_n, \quad \mathbf{Y} = \sum_{n=0}^{255} Y_n, \quad \mathbf{Z} = \sum_{n=0}^{255} Z_n, \quad \mathbf{W} = \sum_{n=0}^{255} W_n.$$

Un método nuevo basado en minimización de parámetros

3. Se implementó la minimización en Python usando un método de búsqueda basado en el gradiente

```
bnnds = ((-1, 1), (-1, 1),(-1, 1), (-1, 1))
x,y,z,w = [0.0001, 0.0001, -0.0001, -0.0001]
res_f = []
for g in range(52):
    I_exp = I_list[g]
    res = fmin_l_bfgs_b(min_sq, [ x,y,z,w], fprime = None,\n                      approx_grad = 1,args = (I_exp ,brakets ),\n                      pgtol=le-05, bounds =bnnds)
    x,y,z,w = res [0]
    res_f[g] = res [0]
    print(res [0])
```

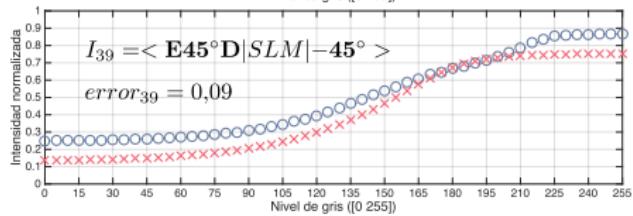
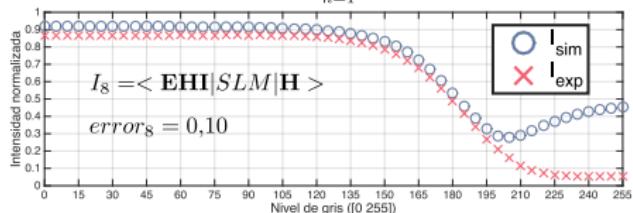
4. Se obtuvieron los siguientes valores de X , Y , Z , y W



Resultados de la caracterización de amplitud con el método de minimización

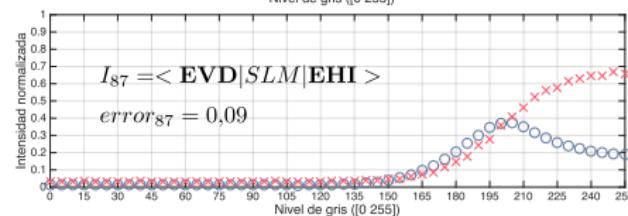
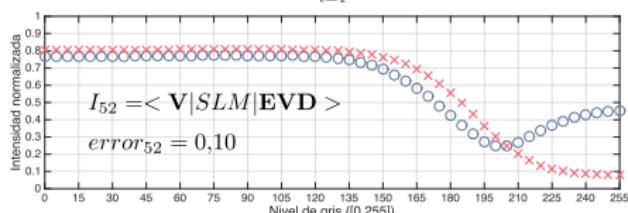
El error para cada estado se definió como:

$$error_i = \sum_{n=1}^{52} \frac{|I_n^e - I_n^s|}{52}$$



El error global del método fue de:

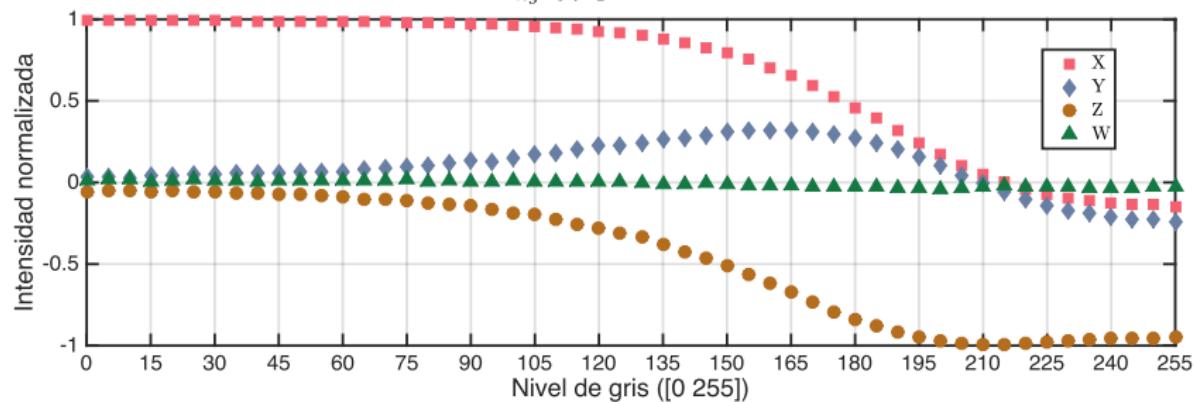
$$error_g = \sum_{i=1}^{100} \frac{error_i}{100} = 0,08$$



Ampliación del nuevo método

¿Qué pasa cuando el funcional se alimenta con muchos más datos?

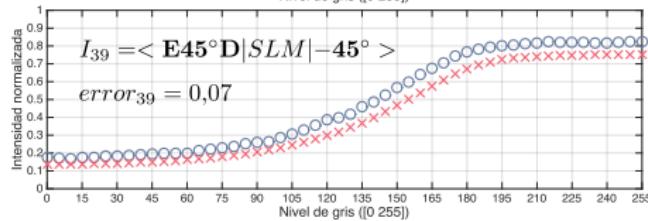
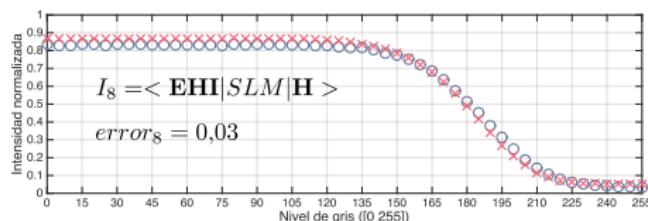
$$\mathcal{L}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{W}) = \sum_{ng=0}^{255} \sum_{i=1}^{100} |I_{ng,i} - |<\mathbf{J}_i|\mathbf{SLM}_{ng}|\mathbf{J}_i>|^2|^2$$



Resultados de la caracterización con 100 medidas

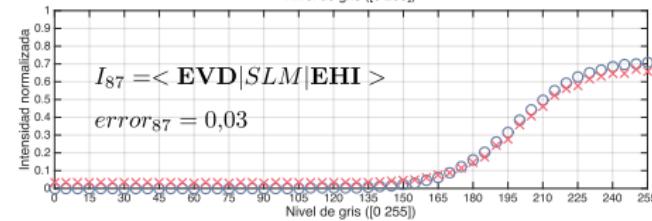
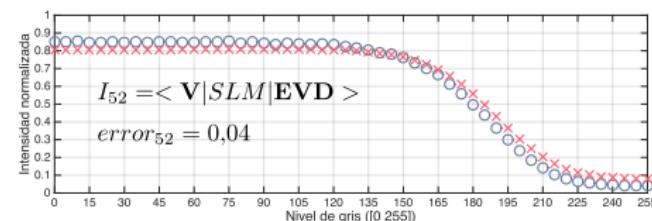
Error para cada estado:

$$error_i = \sum_{n=1}^{52} \frac{|I_n^e - I_n^s|}{52}$$

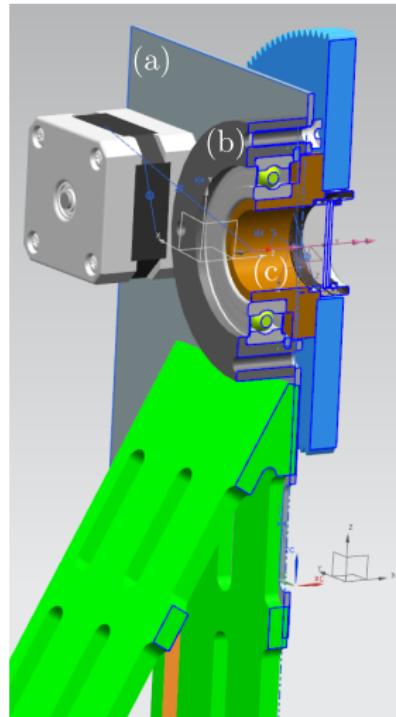
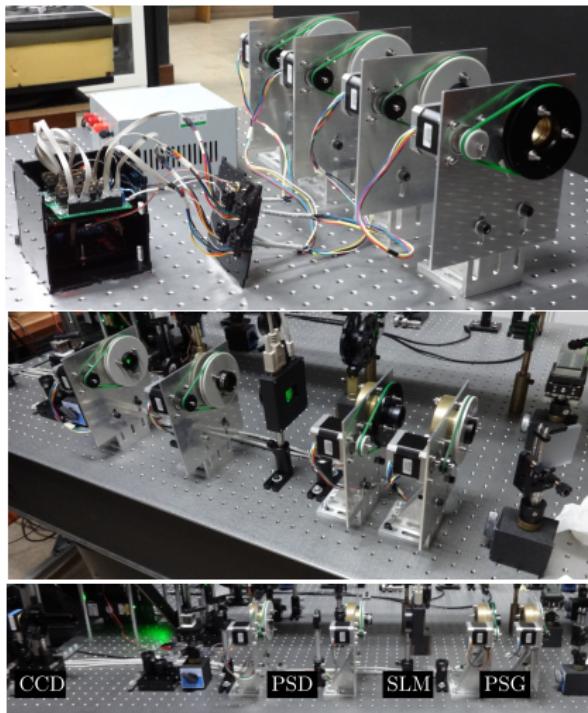


Error global del método fue de:

$$error_g = \sum_{i=1}^{100} \frac{error_i}{100} = 0,02$$



Una plataforma para la automatización de medidas



Una plataforma para la automatización de medidas

(a)

Diretorio scripts ArduinoStepper.py
C:\Users\franjas\Documents\rutinas-calibracion-slm

Comando que está siendo enviado a python
python.exe ArduinoStepper.py -r 3 -- 50

Terminal output
Arduino connected.
b'50'
C 50 n 2 3

(b)

Constant speed
Go to step
Stop
Shutter on
Shutter off
Set Zero
Current Step
Set speed

Comando: -r
Número de motor: 3
Argumento: 50

(c)

Find Zero
Medir pasos por vuelta
Tolerance: 0.1
Min value: 0
Error: 0

Find Zero S2

(d)

Pasos por vuelta para cada motor
M1(745) M2(661) M3(751) M4(757)
Pasos por vuelta: 757
Angulo por paso: 0
Go to angle
Angulo deseado: 0
Angulo final: 0

(e)

Save history data
Save

Current Value: 182.77

Plot 0

Waveform Chart

Amplitude: 183.5, 182.5, 181.5, 180.5, 180, 179.5, 178.5

Time: 6858, 7112

The screenshot displays a user interface for a measurement automation platform. At the top, a terminal window shows the command being sent to a Python script: 'python.exe ArduinoStepper.py -r 3 -- 50'. Below it, a status message indicates 'Arduino connected.' and shows sensor values 'b'50' and 'C 50 n 2 3'. The main interface is divided into several sections: a left panel with buttons for 'Constant speed' controls like 'Go to step', 'Stop', and 'Shutter on/off'; a central panel with 'Find Zero' and 'Medir pasos por vuelta' buttons, and a tolerance input field; and a right panel for setting step counts per revolution for four motors (M1-M4) and a 'Go to angle' section. At the bottom, a waveform chart plots 'Amplitude' (Y-axis, 178.5 to 183.5) against 'Time' (X-axis, 6858 to 7112), showing a periodic signal with a red vertical line at approximately 182.77.

Una plataforma para la automatización de medidas

The image shows a software interface for optical measurement automation, divided into four main sections:

- (a) Configuration Panel:** Displays three input fields:
 - Directorio scripts matlab 2: `C:\Users\franja\Documents\rutinas-calibracion-slm`
 - Camino a ArduinoStepper.py: `C:\Users\franja\Documents\rutinas-calibracion-slm`
 - Txt con medidas a realizar: `C:\Users\franja\Documents\rutinas-calibracion-slm\measures.txt`A green border surrounds this panel.
- (b) Mover angulo (Move Angle) Panel:** Contains:
 - Angulo actual (Current angle): A row of six spinners showing values 0, 0, 0, 0, 0, 0.
 - Nombre de archivo 2 (Name of file 2): An input field containing "In".
 - Ejecutar desde bit (Execute from bit): A button with a play icon.A red border surrounds this panel.
- (c) Live Picture Panel:** Shows a grayscale image of vertical fringes. A blue border surrounds this panel.
- (d) Control Arduino Panel:** Shows the "Sub Control para el Arduino" tab selected. It includes:
 - Terminal output: A text area showing command entries.
 - Control Arduino: A section with a "Constant speed" button and a "Stop" button.
 - Control Modulador: A section with buttons for "Go to step", "Stop", "Shutter on", "Shutter off", "Set zero", "Current Step", and "Set Speed".
 - Arduino: A section with a "Stop Button" button and a "wait until completion? (T)" checkbox.

Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Caracterización de un modulador espacial de luz de transmisión
 - Caracterización de la modulación de amplitud
 - Caracterización de la modulación de fase
- Resultados experimentales

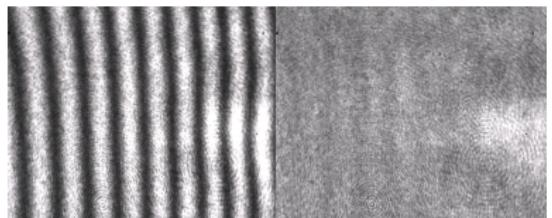
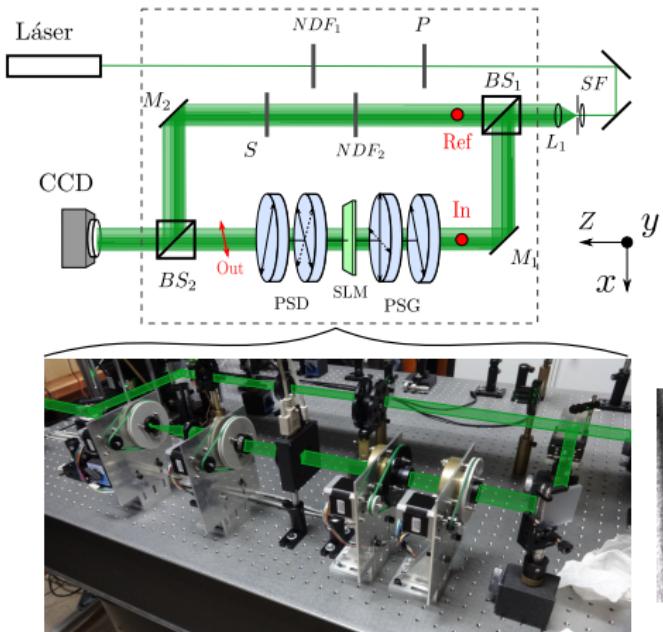
3 Caracterización de aberraciones de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Aberraciones simuladas
- Aberraciones experimentales
- Propuesta de una aplicación para metrología

4 Conclusiones y trabajo futuro

5 Bibliografía

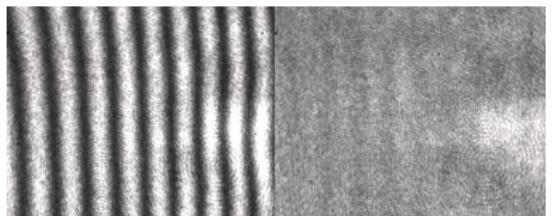
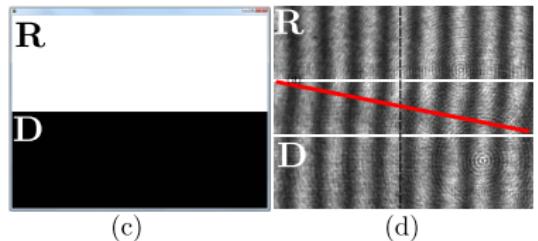
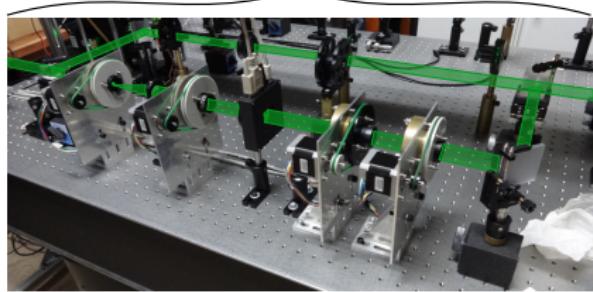
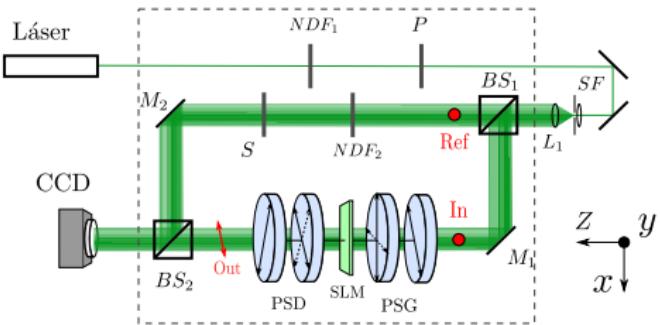
Medida de la modulación de fase



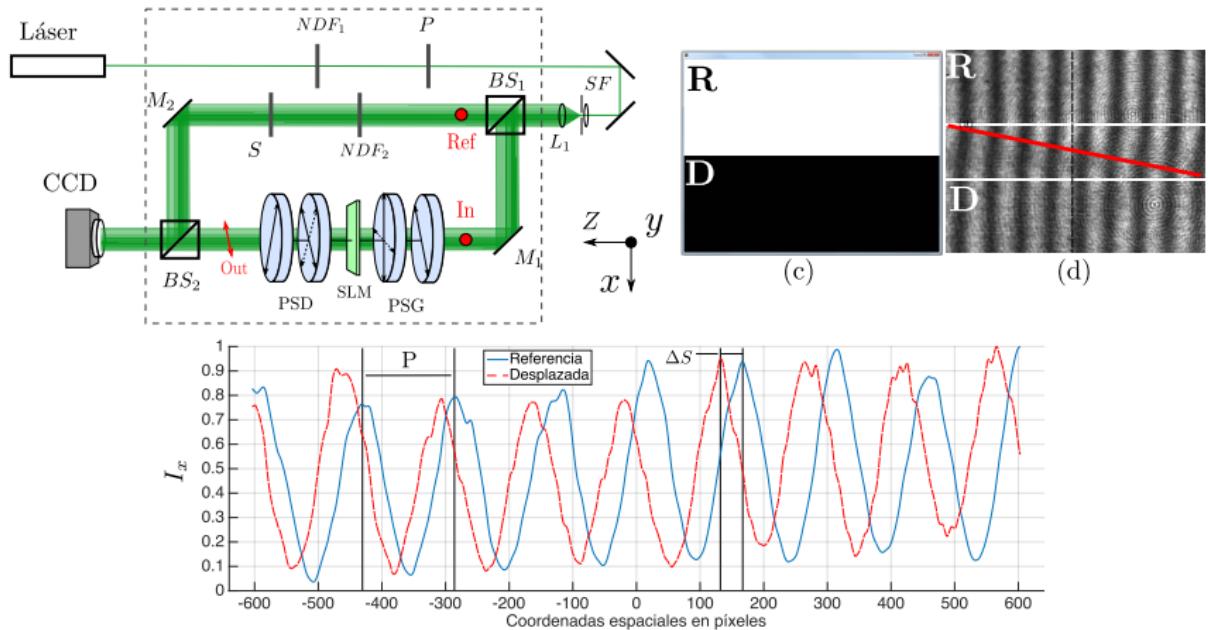
(b)

(a)

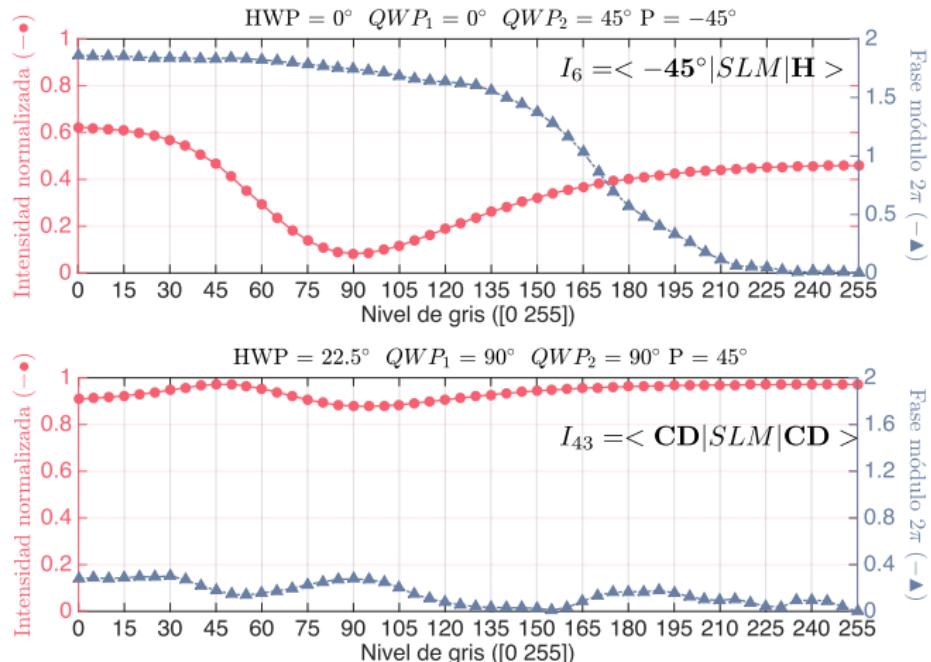
Medida de la modulación de fase



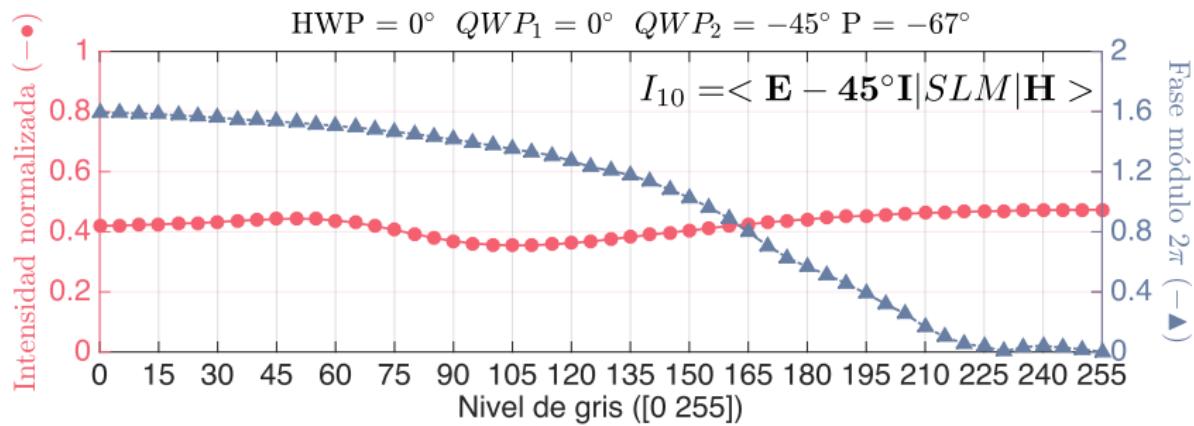
Medida de la modulación de fase



Algunos estados representativos del SLM



El mejor estado encontrado



Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Caracterización de un modulador espacial de luz de transmisión
 - Caracterización de la modulación de amplitud
 - Caracterización de la modulación de fase
- Resultados experimentales

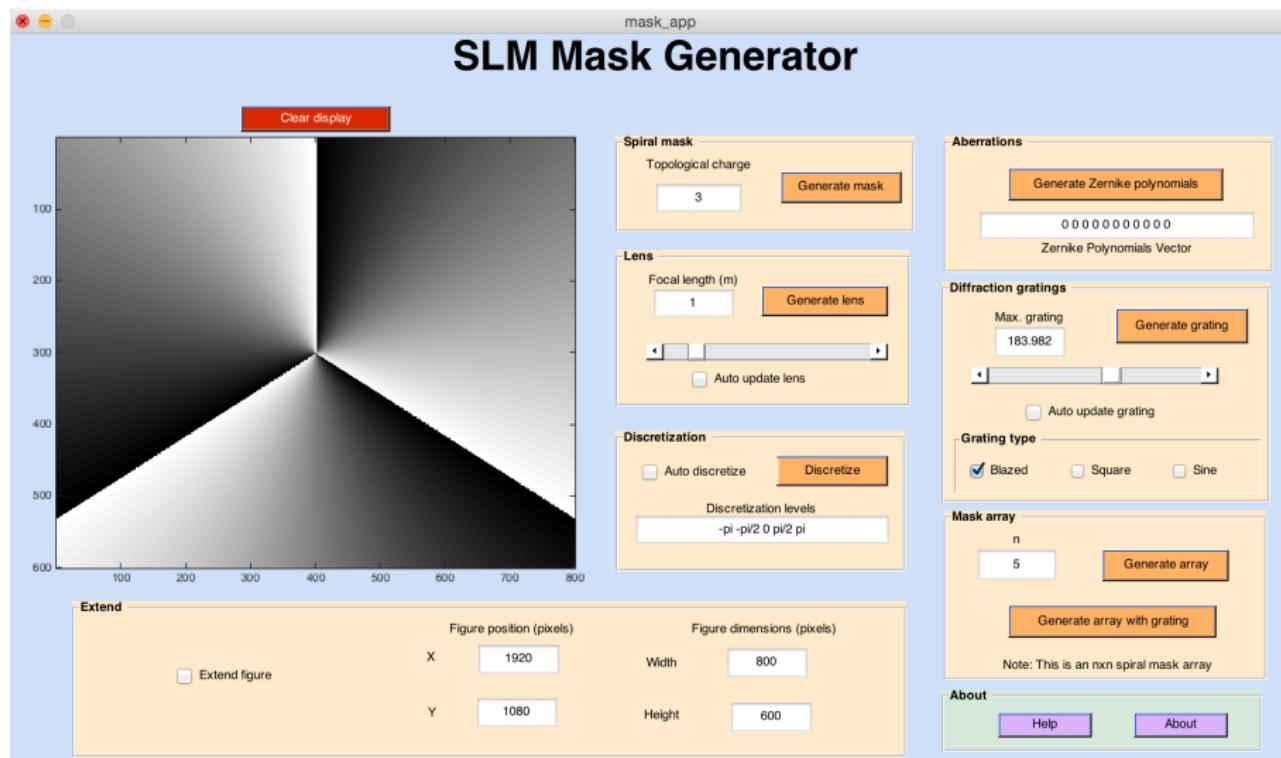
3 Caracterización de aberraciones de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Aberraciones simuladas
- Aberraciones experimentales
- Propuesta de una aplicación para metroología

4 Conclusiones y trabajo futuro

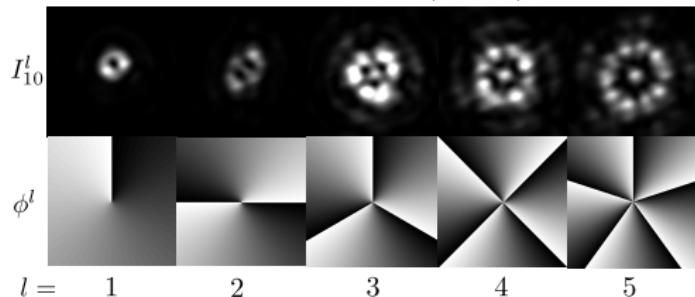
5 Bibliografía

Una plataforma para la generación de máscaras de fase

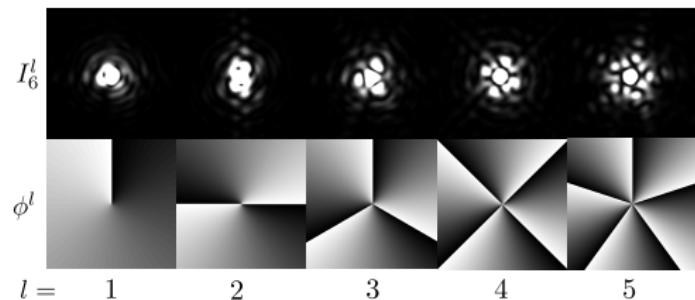


Resultados experimentales: Generación de VOs en eje

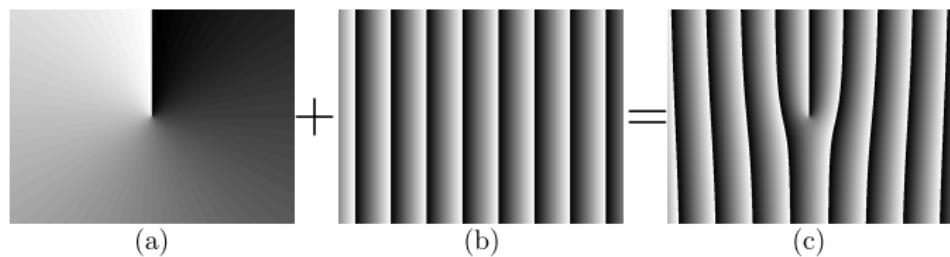
$$I_{10} = \langle \mathbf{E} - 45^\circ \mathbf{I} | SLM | \mathbf{H} \rangle$$



$$I_6 = \langle -45^\circ | SLM | \mathbf{H} \rangle$$



Resultados experimentales: Generación de VOs fuera de eje

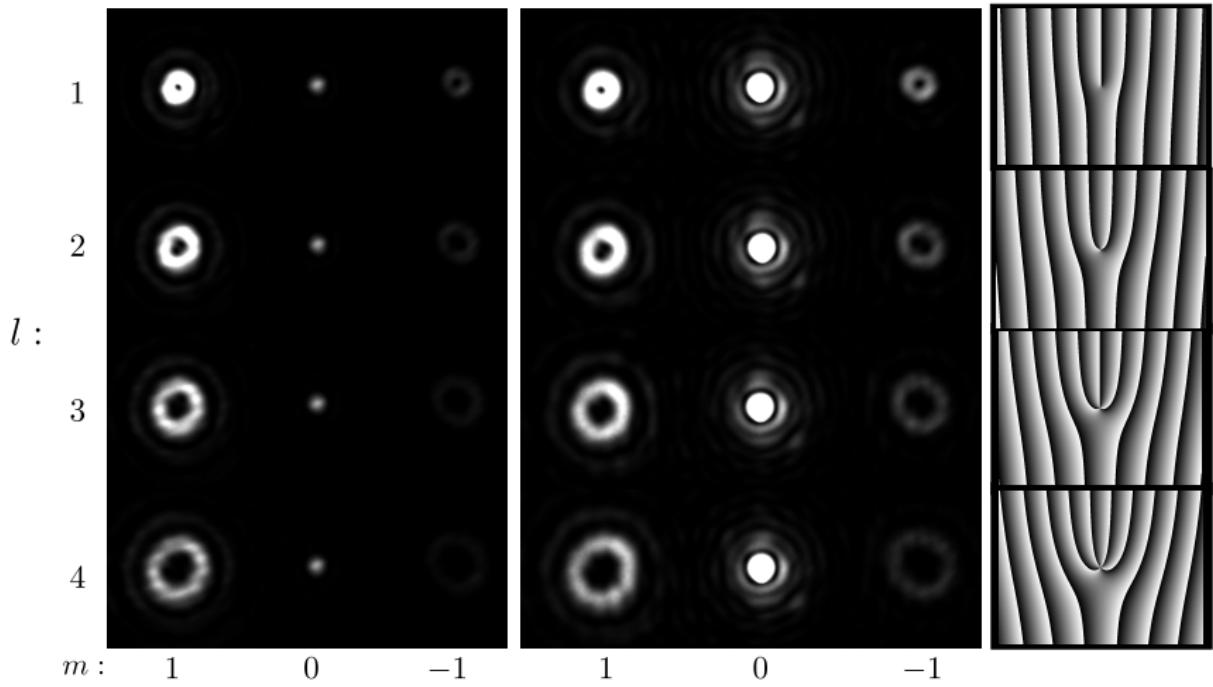


Resultados experimentales: Generación de VOs fuera de eje

$$I_{10} = \langle \mathbf{E} - 45^\circ \mathbf{I} | SLM | \mathbf{H} \rangle$$

$$I_6 = \langle -45^\circ | SLM | \mathbf{H} \rangle$$

$$\phi_l$$

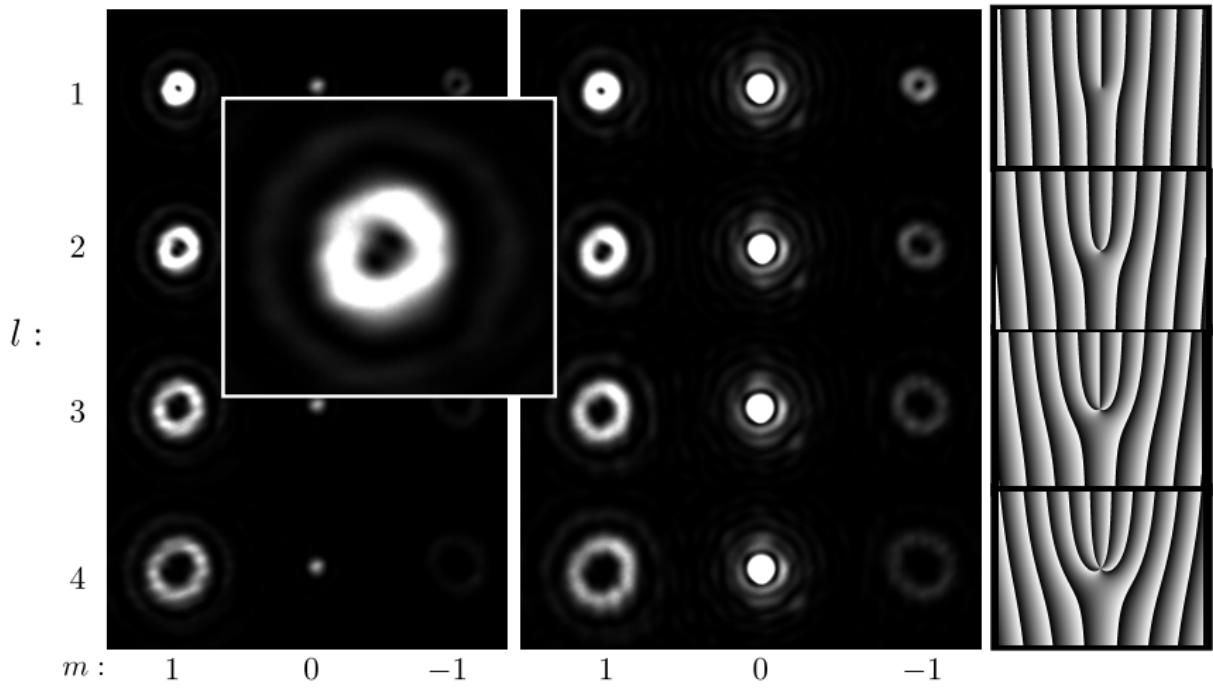


Resultados experimentales: Generación de VOs fuera de eje

$$I_{10} = \langle \mathbf{E} - 45^\circ \mathbf{I} | SLM | \mathbf{H} \rangle$$

$$I_6 = \langle -45^\circ | SLM | \mathbf{H} \rangle$$

$$\phi_l$$



Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Caracterización de un modulador espacial de luz de transmisión
 - Caracterización de la modulación de amplitud
 - Caracterización de la modulación de fase
- Resultados experimentales

3 Caracterización de aberraciones de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Aberraciones simuladas
- Aberraciones experimentales
- Propuesta de una aplicación para metroología

4 Conclusiones y trabajo futuro

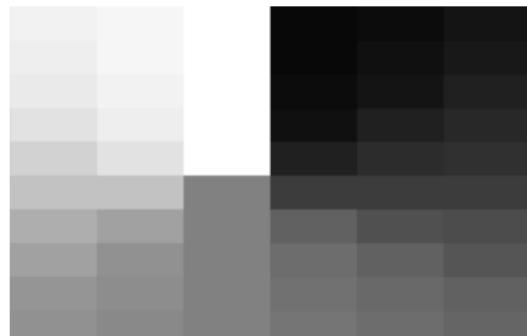
5 Bibliografía

Fuentes de aberraciones

Pueden deberse a imperfecciones en:

- el diseño,
- los materiales,
- la manufactura,
- o la alineación

de elementos ópticos.



En nuestro caso, se deben también a los efectos no deseados que introducen algunas características del SLM como las distintas formas de discretización, el acople entre modulación de fase y de amplitud y el factor de llenado.

¿Cómo caracterizar las aberraciones?

Métodos interferométricos

Se extrae la fase de patrones de interferencia, se desenvuelve y luego se descompone en alguna base.

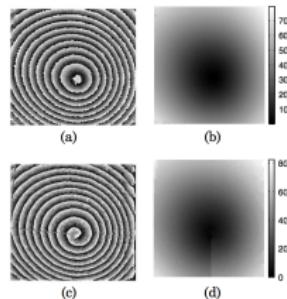
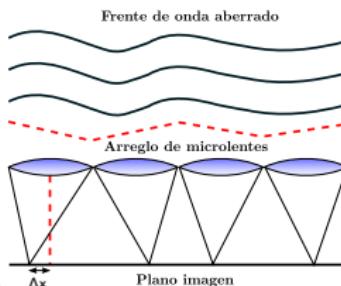


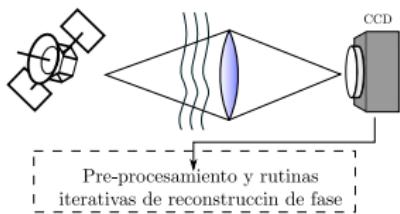
Fig. 4. (a) Traditional ESPI phase modulo 2π using four phase shifts. (b) Traditional ESPI phase unwrap. (c) Spiral ESPI phase modulo 2π using vortex operator. (d) Spiral ESPI phase unwrap.

Métodos no interferométricos

Sensores Shack-Hartmann



Phase retrieval



Electronic speckle pattern interferometry using vortex beams



René Restrepo, Néstor Uribe-Patarroyo, and Tomás Belenguer
View Author Affiliations

Optics Letters, Vol. 36, Issue 23, pp. 4644-4646 (2011)
<http://dx.doi.org/10.1364/OL.36.004644>

¿Cómo caracterizar las aberraciones?

Métodos interferométricos

Se extrae la fase de patrones de interferencia, se desenvuelve y luego se descompone en alguna base.

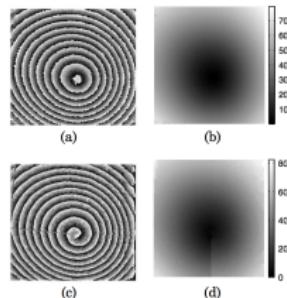


Fig. 4. (a) Traditional ESPI phase modulo 2π using four phase shifts. (b) Traditional ESPI phase unwrap. (c) Spiral ESPI phase modulo 2π using vortex operator. (d) Spiral ESPI phase unwrap.

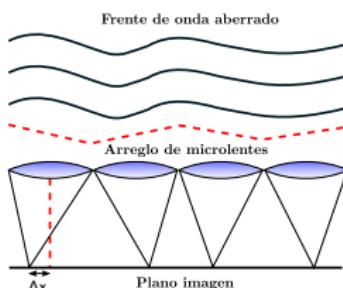


René Restrepo, Néstor Uribe-Patarroyo, and Tomás Belenguer
View Author Affiliations

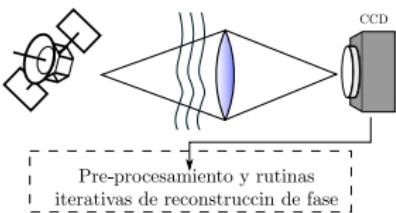
Optics Letters, Vol. 36, Issue 23, pp. 4644-4646 (2011)
<http://dx.doi.org/10.1364/OL.36.004644>

Métodos no interferométricos

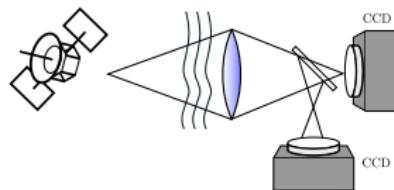
Sensores Shack-Hartmann



Phase retrieval

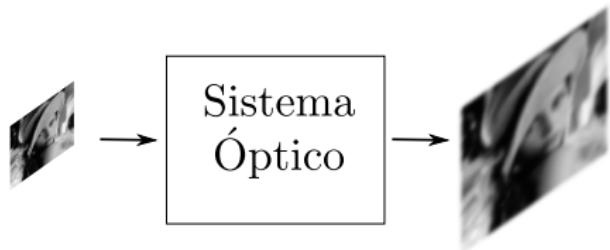


Phase Diversity (PD)



Marco teórico: Sistemas formadores de imagen

Las técnicas de phase retrieval analizan el efecto de las aberraciones sobre las imágenes que produce un sistema óptico. Las aberraciones son caracterizadas cuando se encuentra una función de transferencia que reproduce las imágenes registradas.



Transformaciones de imágenes

$$d(\vec{x}) = d_{obj}(\vec{x}) \otimes s(\vec{x}).$$

$$D(\vec{u}) = D_{obj}(\vec{u})S(\vec{u}).$$

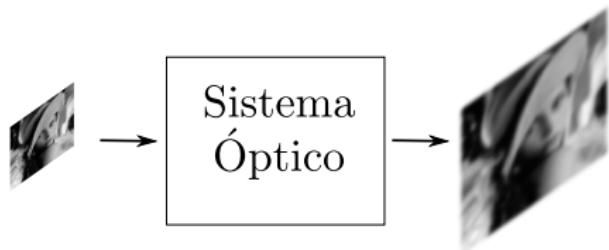
Transformaciones de campos

$$u(\vec{x}) = u_{obj}(\vec{x}) \otimes h(\vec{x}),$$

$$U(\vec{u}) = U_{obj}(\vec{u})H(\vec{u}).$$

Marco teórico: Sistemas formadores de imagen

Las técnicas de phase retrieval analizan el efecto de las aberraciones sobre las imágenes que produce un sistema óptico. Las aberraciones son caracterizadas cuando se encuentra una función de transferencia que reproduce las imágenes registradas.



Transformaciones de imágenes

$$d(\vec{x}) = d_{obj}(\vec{x}) \otimes s(\vec{x}).$$

$$D(\vec{u}) = D_{obj}(\vec{u})S(\vec{u}).$$

Transformaciones de campos

$$u(\vec{x}) = u_{obj}(\vec{x}) \otimes h(\vec{x}),$$

$$U(\vec{u}) = U_{obj}(\vec{u})H(\vec{u}).$$

Funciones respuesta al impulso ópticas

Función de dispersión de punto (PSF)

$$s(\vec{x})$$

Función de transferencia óptica (OTF)

$$S(\vec{u})$$

Relaciones importantes

$$S(\vec{u}) = \mathcal{F}\{s(\vec{x})\},$$

$$D(\vec{u}) = \mathcal{F}\{d(\vec{x})\},$$

$$U(\vec{u}) = \mathcal{F}\{u(\vec{x})\} = A(\vec{u})e^{i\phi(\vec{u})},$$

PSF de amplitud (APSF)

$$s(\vec{x}) = |h(\vec{x})|^2,$$

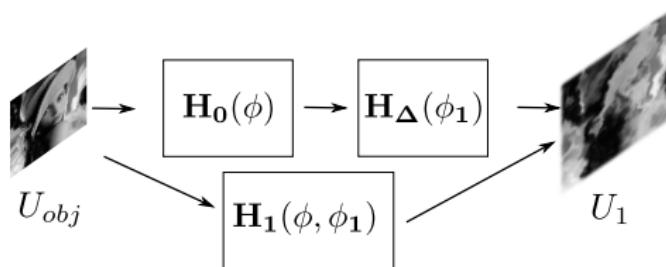
Pupila Generalizada (GP)

$$S(\vec{u}) = \frac{H(\vec{u}) \star H(\vec{u})}{|H(\vec{u})|^2}.$$

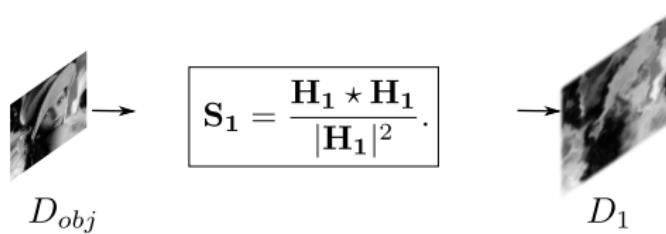
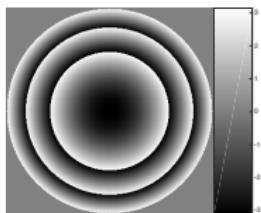
$$\begin{array}{c} h(\vec{x}) \\ \hline H(\vec{u}) \end{array}$$

Funciones de transferencia ópticas

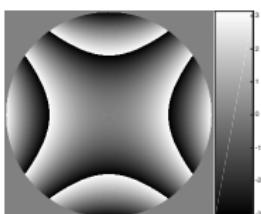
Marco teórico: Phase diversity



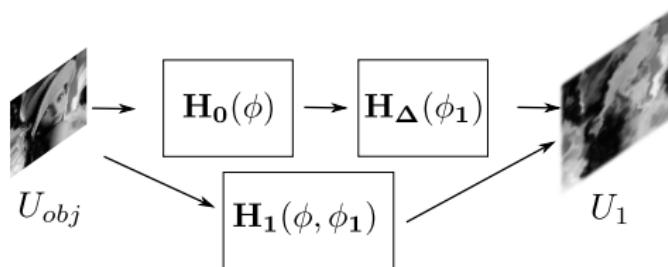
Tradicionalmente se han usado
desenfoques como diversidad



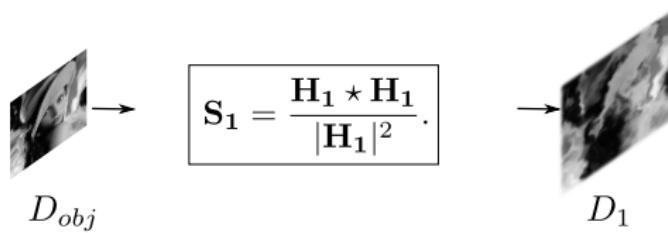
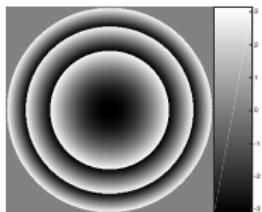
Los dispositivos de fase programable
permiten incluir cualquier tipo de
diversidades, como por ejemplo,
astigmatismo.



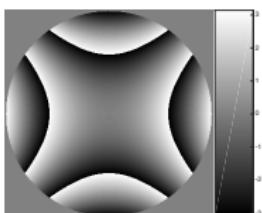
Marco teórico: Phase diversity



Tradicionalmente se han usado
desenfoques como diversidad



Los dispositivos de fase programable
permiten incluir cualquier tipo de
diversidades, como por ejemplo,
astigmatismo.

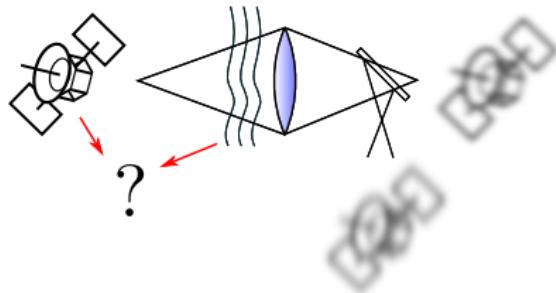


Funcional de minimización

$$L(\bar{D}_{obj}, \phi) = \sum_{j=0}^K \sum_{u,v}^{M,N} |D_j - \bar{D}_{obj} S_j|^2.$$

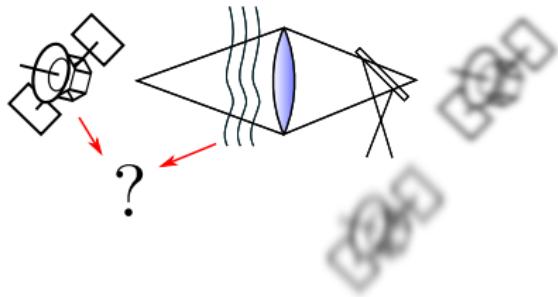
Marco teórico: Phase diversity con iluminación coherente

En aplicaciones clásicas de PD
el objeto es una de las incógnitas



Marco teórico: Phase diversity con iluminación coherente

En aplicaciones clásicas de PD
el objeto es una de las incógnitas



En el laboratorio podemos escoger el tipo de iluminación y definir nuestro propio u_{obj}

$$u_{obj} = e^{\frac{-(x^2+y^2)}{\sigma}}$$

$$u_j(\vec{x}) = \mathcal{F}^{-1}\{U_{obj}H_0(\vec{u})H_j(\vec{u})\}$$

Un nuevo funcional de minimización

$$L_j(\phi) = \sum_{j=0}^K \sum_{u,v}^{M,N} |d_j - |u_j|^2|^2$$

Marco teórico: Phase diversity con iluminación coherente mejorado con VOs

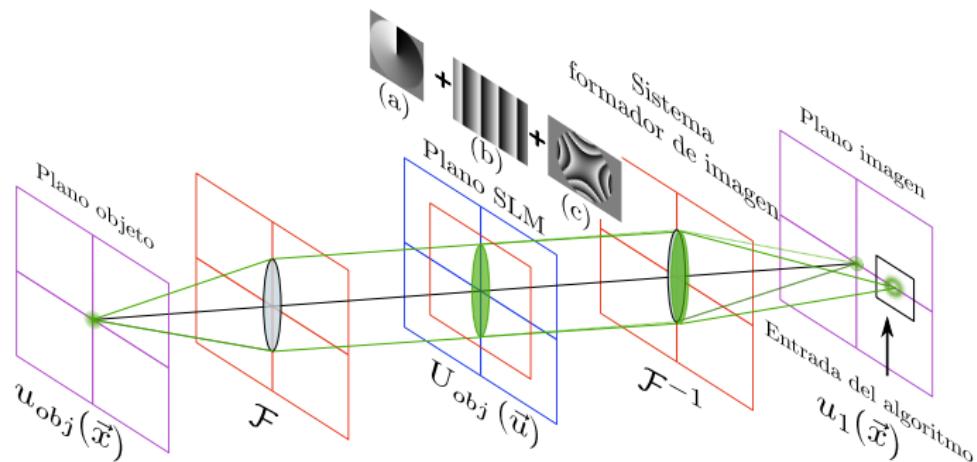
Una nueva familia de diversidades

$$\psi_l = \arg(\exp(il\theta)),$$

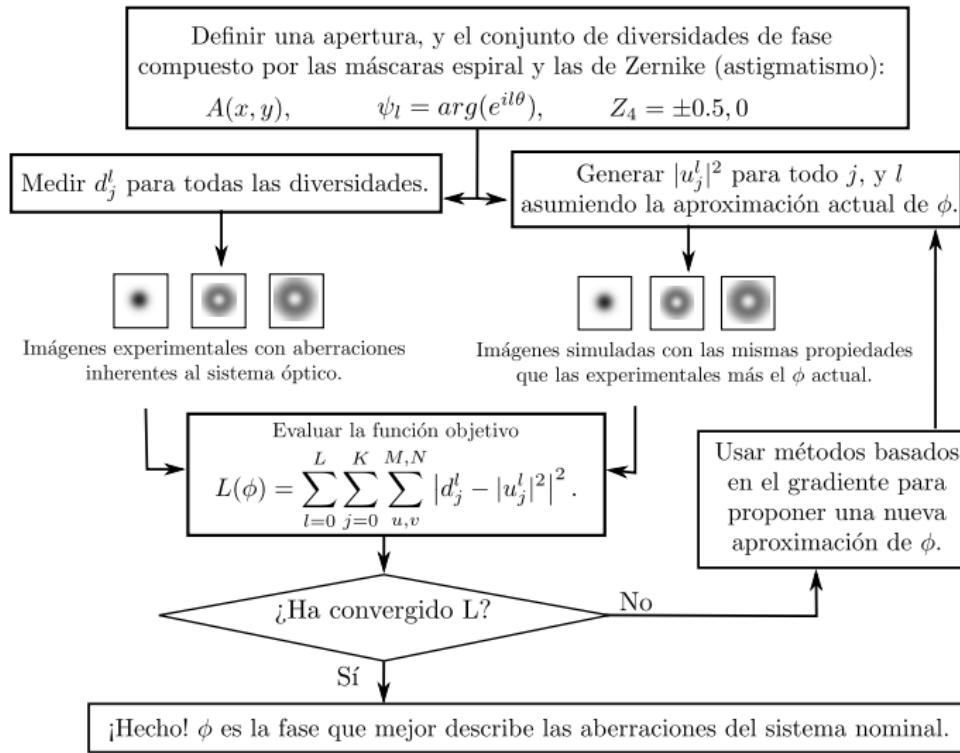
$$u_j^l = \mathcal{F}^{-1}\{U_{obj}Ae^{i(\phi+\psi_l+\phi_j)}\}.$$

Funcional extendido

$$L(\phi) = \sum_{l=0}^L \sum_{j=0}^K \sum_{u,v}^{M,N} \left| d_j^l - |u_j^l|^2 \right|^2. \quad (1)$$



Marco teórico: Algoritmo de la implementación



Detección de aberraciones simuladas: Metodología

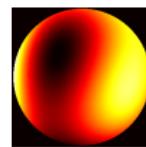
Preparación de fases de referencia

$$\phi(\vec{u}) = \sum_{i=1}^{N=15} a_i Z_i(\vec{u}).$$

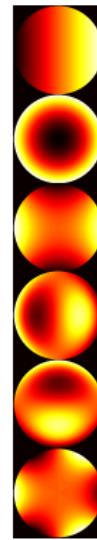

Métrica de la magnitud de las aberraciones

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{N=15} a_i^2}.$$

Función Aberración



$$= \sum$$



Z_2 : Inclinación en y
 $a_2 = 0,4$

Z_4 : Desenfoque
 $a_4 = 0,2$

Z_5 : Astigmatismo en y
 $a_5 = 0,4$

Z_7 : Coma en y
 $a_7 = -0,5$

Z_8 : Coma en x
 $a_8 = 0,3$

Z_{10} Trefoil en x
 $a_{10} = -0,2$

Detección de aberraciones simuladas: Metodología

Preparación de fases de referencia

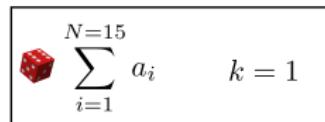
$$\phi(\vec{u}) = \sum_{i=1}^{N=15} a_i Z_i(\vec{u}).$$



Métrica de la magnitud de las aberraciones

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{N=15} a_i^2}.$$

Generación de pesos aleatorios



Medida del RMS

$$\sigma = k \sqrt{\sum_{i=1}^{N=15} a_i^2}.$$

Modificar k siguiendo un esquema de búsqueda del gradiente.

¿ $|\sigma_j - \sigma| <= \epsilon?$

No

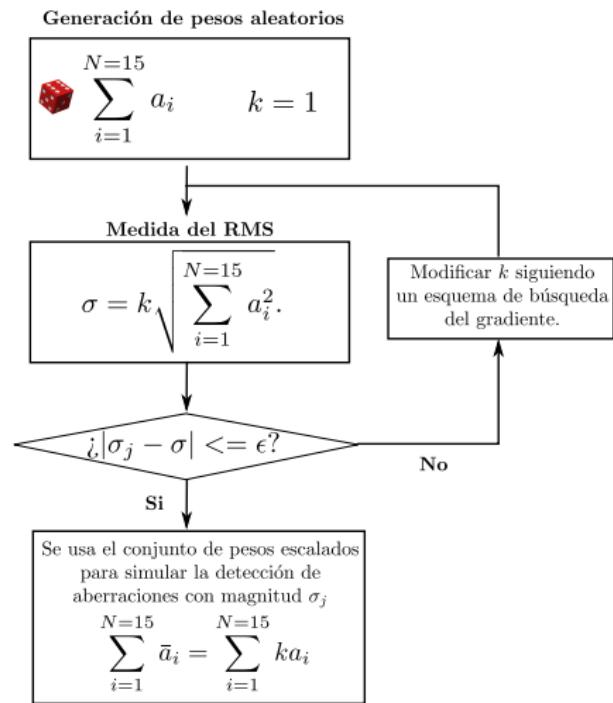
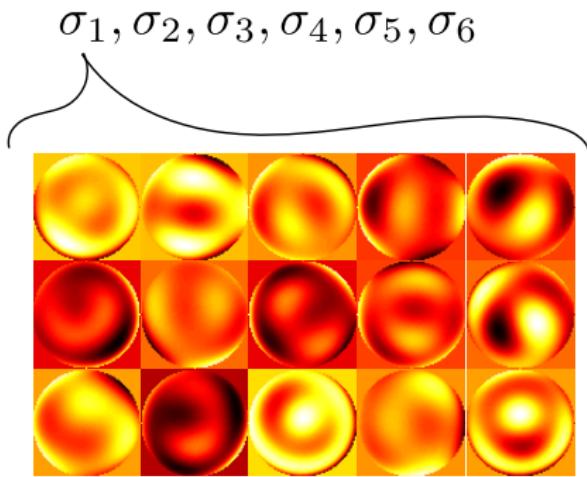
Si

Se usa el conjunto de pesos escalados para simular la detección de aberraciones con magnitud σ_j

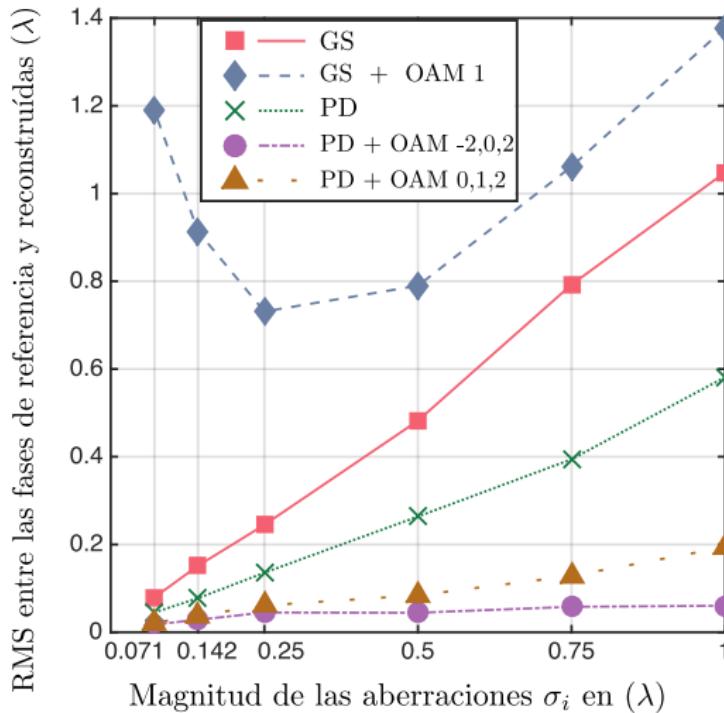
$$\sum_{i=1}^{N=15} \bar{a}_i = \sum_{i=1}^{N=15} k a_i$$

Detección de aberraciones simuladas: Metodología

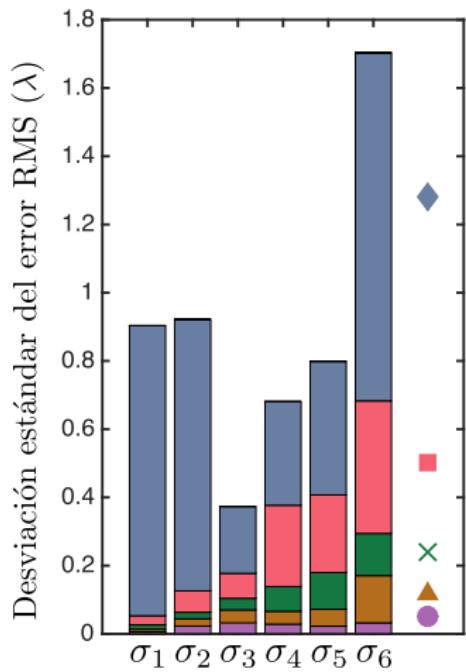
Para cada magnitud se creó un conjunto de 15 réplicas aleatorias



Detección de aberraciones simuladas: Resultados

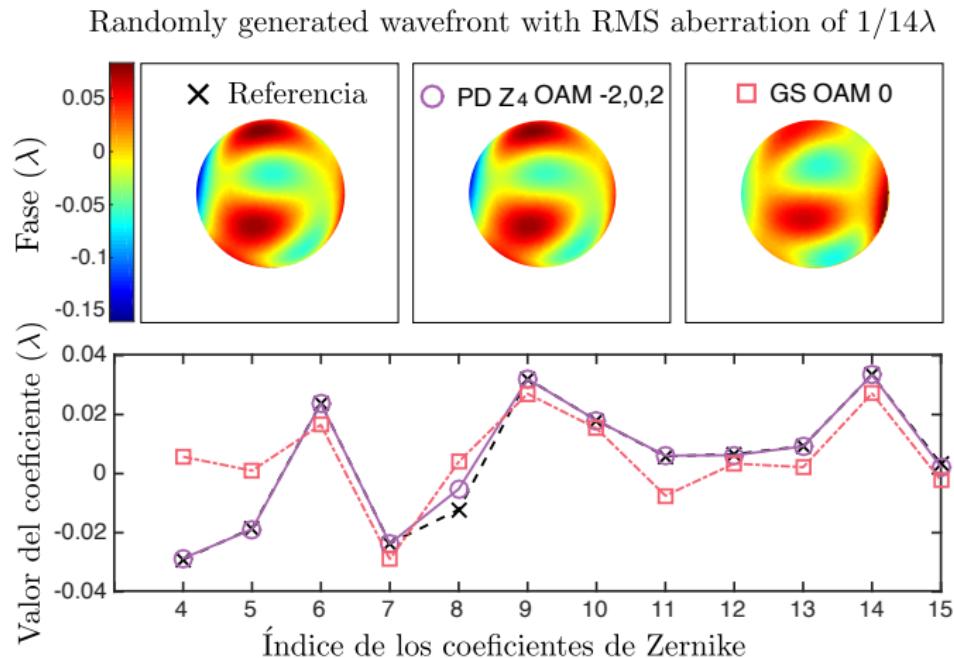


(a)



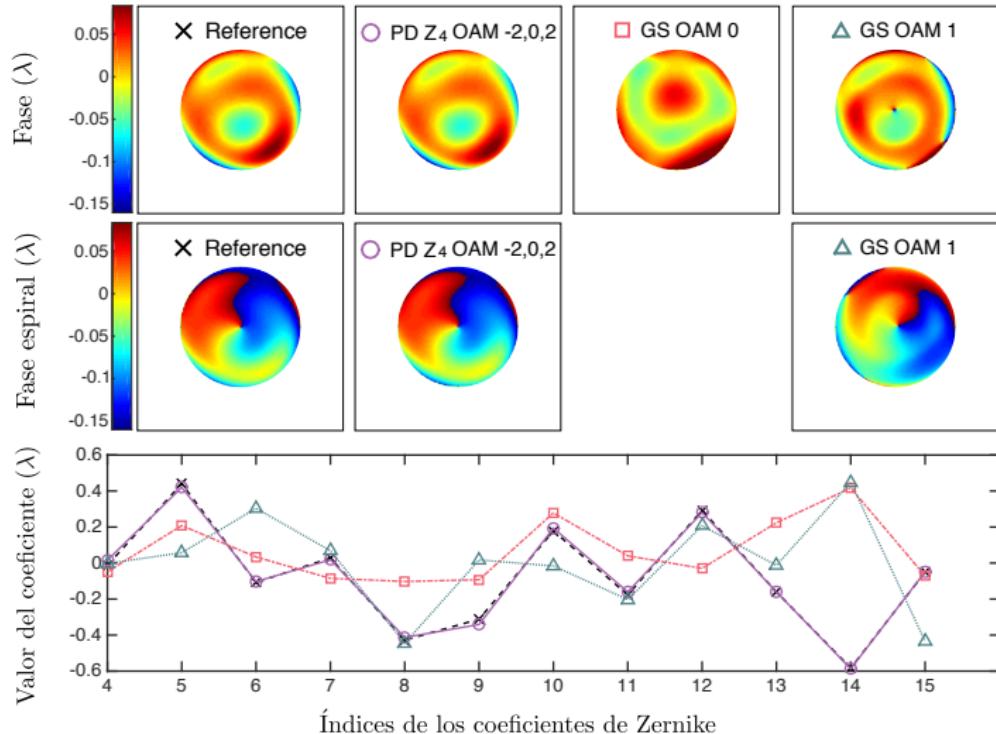
(b)

Detección de aberraciones simuladas: Resultados



Detección de aberraciones simuladas: Resultados

Frente de onda aberrado con RMS de $1/14\lambda$ generados aleatoriamente.



Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Caracterización de un modulador espacial de luz de transmisión
 - Caracterización de la modulación de amplitud
 - Caracterización de la modulación de fase
- Resultados experimentales

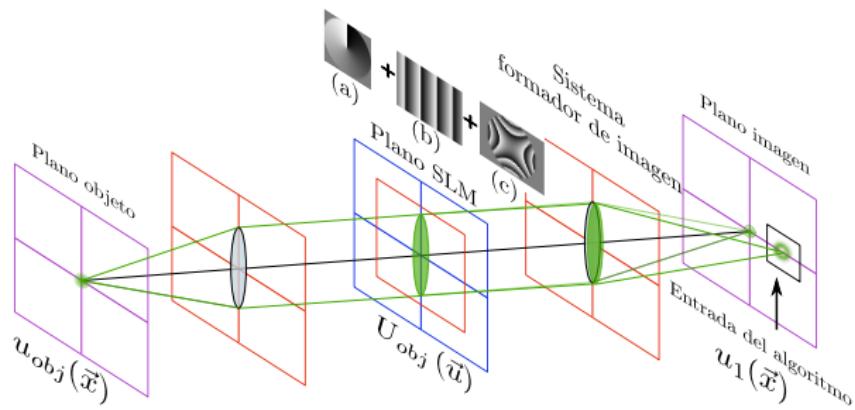
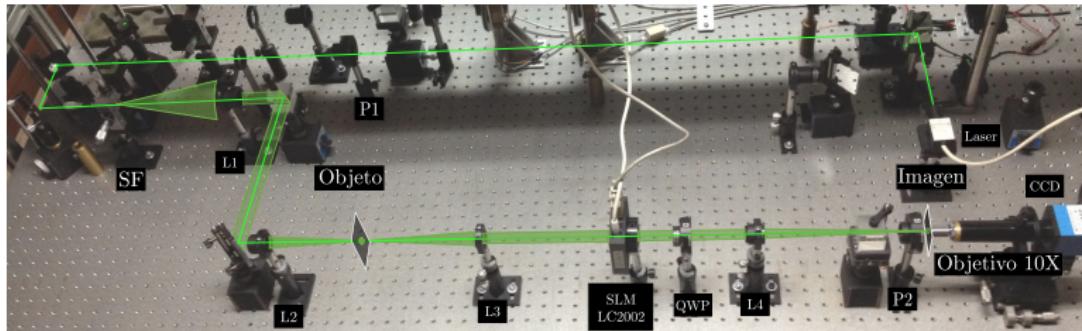
3 Caracterización de aberraciones de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Aberraciones simuladas
- Aberraciones experimentales
- Propuesta de una aplicación para metroología

4 Conclusiones y trabajo futuro

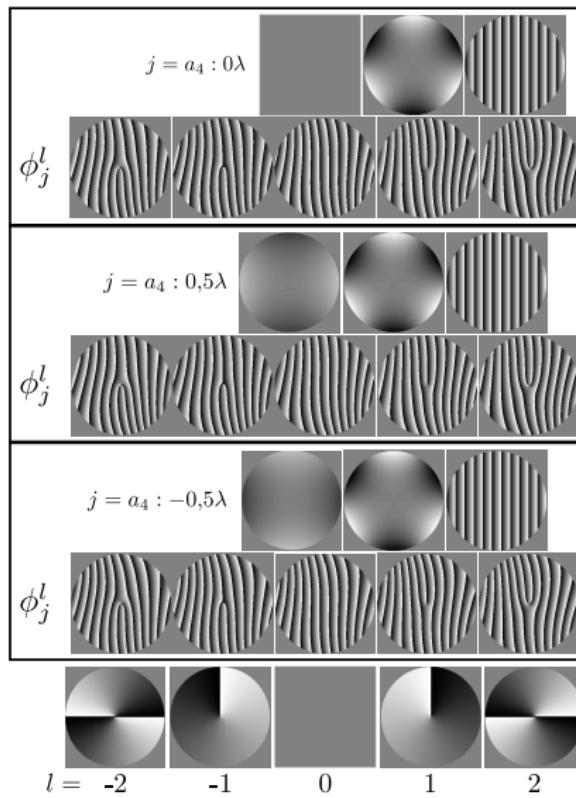
5 Bibliografía

Detección de aberraciones experimentales: Metodología



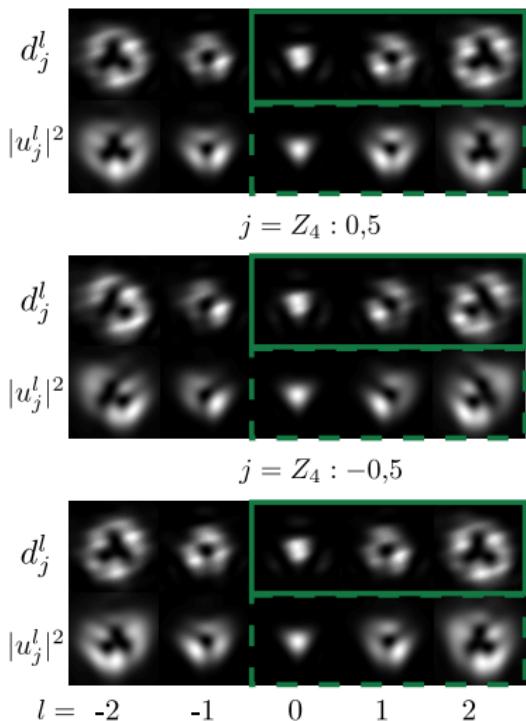
Detección de aberraciones experimentales: Metodología

$$Z_{10} : a_{10} = 1\lambda$$

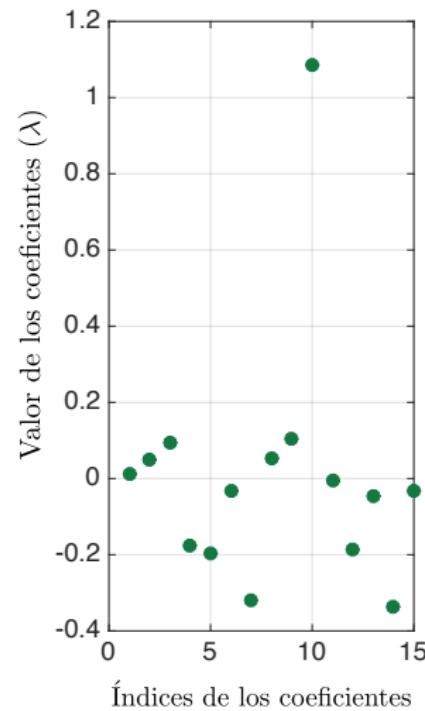


Detección de aberraciones experimentales: Resultados

$$j = Z_4 : 0$$

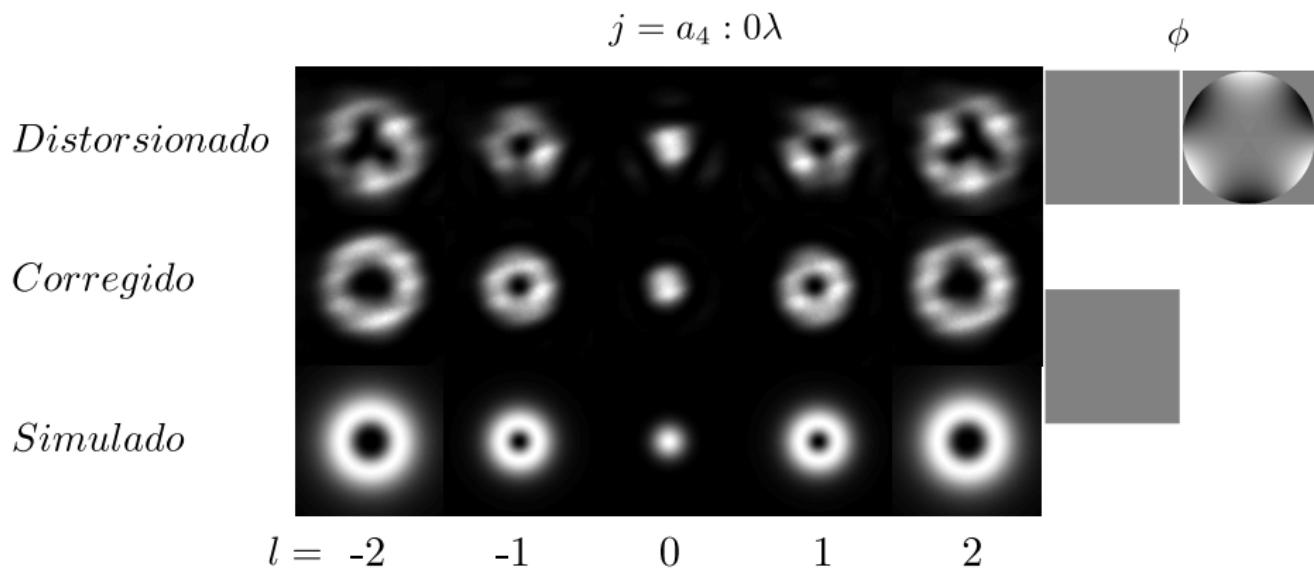


(a)

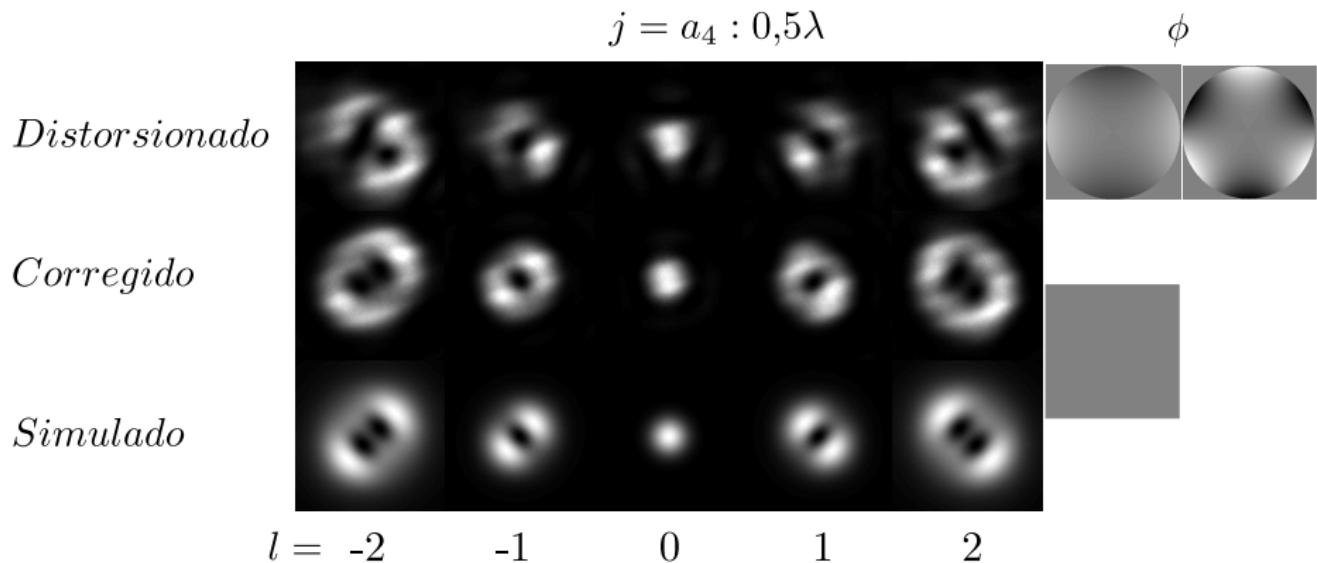


(b)

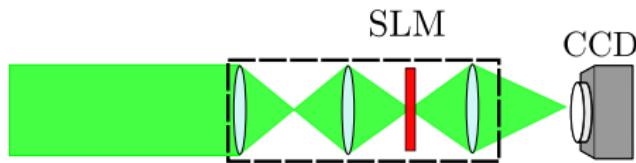
Detección de aberraciones experimentales: Resultados



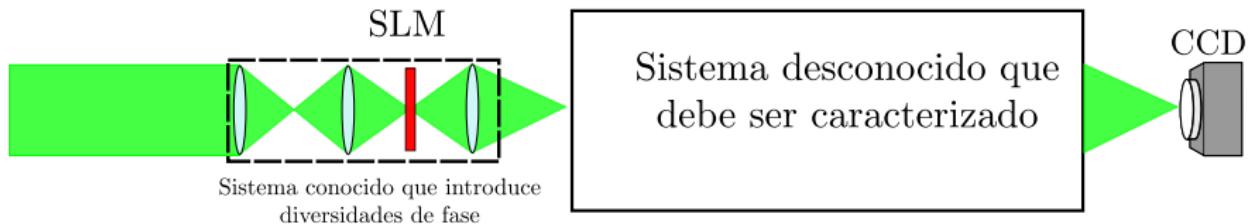
Detección de aberraciones experimentales: Resultados



Propuesta de una aplicación para metroología



Propuesta de una aplicación para metroología



Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Caracterización de un modulador espacial de luz de transmisión
 - Caracterización de la modulación de amplitud
 - Caracterización de la modulación de fase
- Resultados experimentales

3 Caracterización de aberraciones de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Aberraciones simuladas
- Aberraciones experimentales
- Propuesta de una aplicación para metroología

4 Conclusiones y trabajo futuro

5 Bibliografía

Conclusiones I

- Se mostró el resultado de una labor investigativa con la cual fue posible establecer un marco y teórico y una metodología para la caracterización y puesta a punto de un TN-SLM.

Conclusiones I

- Se mostró el resultado de una labor investigativa con la cual fue posible establecer un marco y teórico y una metodología para la caracterización y puesta a punto de un TN-SLM.
- Se presentó un sistema automatizado para la caracterización de elementos birrefringentes que se compone de una parte física, y una parte de software.

Conclusiones I

- Se mostró el resultado de una labor investigativa con la cual fue posible establecer un marco y teórico y una metodología para la caracterización y puesta a punto de un TN-SLM.
- Se presentó un sistema automatizado para la caracterización de elementos birrefringentes que se compone de una parte física, y una parte de software.
- Asimismo, se desarrolló y puso en proceso de registro una aplicación de software en la plataforma Matlab® para la generación de máscaras de fase arbitrarias a ser proyectadas en el SLM. Esta aplicación permite:
 - Crear máscaras de fase espiral de carga entera arbitraria sumadas a:
 - Lentes.
 - Rejillas de difracción de varios tipos.
 - Aberraciones ópticas compuestas a partir de polinomios de Zernike.
 - Discretizar las máscaras de fase en la cantidad de niveles deseados, y asignando valores predeterminados a cada uno.

Conclusiones I

- Se mostró el resultado de una labor investigativa con la cual fue posible establecer un marco y teórico y una metodología para la caracterización y puesta a punto de un TN-SLM.
- Se presentó un sistema automatizado para la caracterización de elementos birrefringentes que se compone de una parte física, y una parte de software.
- Asimismo, se desarrolló y puso en proceso de registro una aplicación de software en la plataforma Matlab® para la generación de máscaras de fase arbitrarias a ser proyectadas en el SLM. Esta aplicación permite:
 - Crear máscaras de fase espiral de carga entera arbitraria sumadas a:
 - Lentes.
 - Rejillas de difracción de varios tipos.
 - Aberraciones ópticas compuestas a partir de polinomios de Zernike.
 - Discretizar las máscaras de fase en la cantidad de niveles deseados, y asignando valores predeterminados a cada uno.
- Se generaron VOs en un sistema óptico 4F usando dos tipos distintos de máscaras de fase. Y se detectó que aún con buena modulación no se corrigen del todo las aberraciones.

Conclusiones I

- Se mostró el resultado de una labor investigativa con la cual fue posible establecer un marco y teórico y una metodología para la caracterización y puesta a punto de un TN-SLM.
- Se presentó un sistema automatizado para la caracterización de elementos birrefringentes que se compone de una parte física, y una parte de software.
- Asimismo, se desarrolló y puso en proceso de registro una aplicación de software en la plataforma Matlab® para la generación de máscaras de fase arbitrarias a ser proyectadas en el SLM. Esta aplicación permite:
 - Crear máscaras de fase espiral de carga entera arbitraria sumadas a:
 - Lentes.
 - Rejillas de difracción de varios tipos.
 - Aberraciones ópticas compuestas a partir de polinomios de Zernike.
 - Discretizar las máscaras de fase en la cantidad de niveles deseados, y asignando valores predeterminados a cada uno.
- Se generaron VOs en un sistema óptico 4F usando dos tipos distintos de máscaras de fase. Y se detectó que aún con buena modulación no se corrigen del todo las aberraciones.

Conclusiones II

- Se desarrolló un método traído de aplicaciones en astronomía para la detección y corrección de aberraciones ópticas en haces con vorticidad óptica.

Conclusiones II

- Se desarrolló un método traído de aplicaciones en astronomía para la detección y corrección de aberraciones ópticas en haces con vorticidad óptica.
- Este método fue validado mediante numerosas simulaciones, y experimentos y se propuso como la base para un instrumento que puede ser usado en aplicaciones metrológicas.

Trabajo futuro

- Estudiar la generación de vórtices ópticos con iluminación parcialmente coherente y

Trabajo futuro

- Estudiar la generación de vórtices ópticos con iluminación parcialmente coherente y
- extender el método de PD para este caso.

Trabajo futuro

- Estudiar la generación de vórtices ópticos con iluminación parcialmente coherente y
- extender el método de PD para este caso.
- Exploración de una técnica de polarimetría-interfermoétrica basada en derivada de las investigaciones para la caracterización del SLM.

Trabajo futuro

- Estudiar la generación de vórtices ópticos con iluminación parcialmente coherente y
- extender el método de PD para este caso.
- Exploración de una técnica de polarimetría-interfermoétrica basada en derivada de las investigaciones para la caracterización del SLM.
- Implementar la propuesta de una herramienta basada en nuestro método para la caracterización de sistemas complejos. Por ejemplo sistemas de escritura punto a punto en hologramas sintéticos.

Trabajo futuro

- Estudiar la generación de vórtices ópticos con iluminación parcialmente coherente y
- extender el método de PD para este caso.
- Exploración de una técnica de polarimetría-interfermoétrica basada en derivada de las investigaciones para la caracterización del SLM.
- Implementar la propuesta de una herramienta basada en nuestro método para la caracterización de sistemas complejos. Por ejemplo sistemas de escritura punto a punto en hologramas sintéticos.
- Aplicar los métodos y habilidades desarrollados para la implementación de un microscopio de fase con iluminación espiral.

¿Preguntas?



Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Caracterización de un modulador espacial de luz de transmisión
 - Caracterización de la modulación de amplitud
 - Caracterización de la modulación de fase
- Resultados experimentales

3 Caracterización de aberraciones de vórtices ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Aberraciones simuladas
- Aberraciones experimentales
- Propuesta de una aplicación para metrología

4 Conclusiones y trabajo futuro

5 Bibliografía

Bibliografía I

- [1] Nestor Uribe-Patarroyo. *Optical Space Applications of Liquid Crystals: Polarimetry and Photon Orbital Angular Momentum in Remote Sensing*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Laboratorio de Instrumentación Espacial Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, 2011.
- [2] Baiheng Ma, Baoli Yao, Tong Ye, and Ming Lei. Prediction of optical modulation properties of twisted-nematic liquid-crystal display by improved measurement of jones matrix. *Journal of Applied Physics*, 107(7):073107, 2010.
- [3] M. J. Padgett and L. Allen. The angular momentum of light: optical spanners and the rotational frequency shift. *Optical and quantum electronics*, 31(1):1–12, 1999.
- [4] Chen Jun, Kuang Deng-Feng, Gui Min, and Fang Zhi-Liang. Generation of optical vortex using a spiral phase plate fabricated in quartz by direct laser writing and inductively coupled plasma etching. *Chinese Physics Letters*, 26(1):014202, 2009.
- [5] Jian Wang, Jeng-Yuan Yang, Irfan M. Fazal, Nisar Ahmed, Yan Yan, Hao Huang, Yongxiong Ren, Yang Yue, Samuel Dolinar, Moshe Tur, and Alan E. Willner. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing. *Nature Photonics*, 6(7):488–496, July 2012.
- [6] Nenad Bozinovic, Yang Yue, Yongxiong Ren, Moshe Tur, Poul Kristensen, Hao Huang, Alan E. Willner, and Siddharth Ramachandran. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers. *Science*, 340(6140):1545–1548, June 2013.
- [7] Alexander Jesacher, Severin Fürhapter, Stefan Bernet, and Monika Ritsch-Marte. Shadow effects in spiral phase contrast microscopy. *Physical Review Letters*, 94(23):233902, June 2005.
- [8] Severin Fürhapter, Alexander Jesacher, Stefan Bernet, and Monika Ritsch-Marte. Spiral interferometry. *Optics Letters*, 30(15):1953–1955, August 2005.
- [9] Luciano Angel-Toro, Daniel Sierra-Sosa, Myrian Tebaldi, and Néstor Bolognini. Vortex metrology using fourier analysis techniques: vortex networks correlation fringes. *Applied Optics*, 51(30):7411–7419, October 2012.
- [10] Luciano Angel-Toro, Daniel Sierra-Sosa, Myrian Tebaldi, and Néstor Bolognini. In-plane displacement measurement in vortex metrology by synthetic network correlation fringes. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 30(3):462–469, March 2013.

Bibliografía II

- [11] Daniel Sierra-Sosa, Luciano Angel-Toro, Nestor Bolognini, and Myrian Tebaldi. Novel vortex-transform for high frequency modulated patterns. *Optics Express*, 21(20):23706–23711, October 2013.
- [12] Daniel Gomez-Tejada, Daniel Sierra-Sosa, Román Castañeda, and Luciano Angel-Toro. Effect of the internal modulation of speckles in displacement measurements in optical vortex metrology. volume 8785, pages 87858C–87858C–7, 2013.
- [13] M. S. Soskin, V. N. Gorshkov, M. V. Vasnetsov, J. T. Malos, and N. R. Heckenberg. Topological charge and angular momentum of light beams carrying optical vortices. *Physical Review A*, 56(5):4064–4075, November 1997.
- [14] René Restrepo, Néstor Uribe-Patarroyo, and Tomás Belenguer. Electronic speckle pattern interferometry using vortex beams. *Optics Letters*, 36(23):4644, December 2011.
- [15] Daniel Sierra-Sosa. *Estudio de Singularidades de Fase con Aplicaciones a la Metroología*. PhD thesis, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2014.
- [16] Jennifer E. Curtis and David G. Grier. Modulated optical vortices. *Opt. Lett.*, 28(11):872–874, June 2003.
- [17] N. R. Heckenberg, R. McDuff, C. P. Smith, and A. G. White. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms. *Opt. Lett.*, 17(3):221–223, 1992.

Contexto



PROSPERIDAD
PARA TODOS

CONVOCATORIA 645 DE 2014. JÓVENES INVESTIGADORES E INNOVADORES

Banco de Financiables

El Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación – COLCIENCIAS, presenta a continuación el banco de financiables, conformado por 1.007 becas-pasantías para formación de jóvenes investigadores, según la siguiente relación:

- 367 GRUPOS A1 CON ASIGNACIÓN AUTOMÁTICA DE UN JOVEN INVESTIGADOR
- 636 JOVENES ASIGNADOS A ENTIDADES Y GRUPOS DE INVESTIGACIÓN, SEGÚN PROYECTO DE INVESTIGACIÓN POSTULADO A LA CONVOCATORIA
- 4 JÓVENES INVESTIGADORES CONVENIO OTTO DE GREIFF

367 GRUPOS A1 CON ASIGNACIÓN AUTOMÁTICA DE UN JOVEN INVESTIGADOR

Nombre Institución	Nombre Grupo	Proyecto avalado
UNIVERSIDAD DEL VALLE - UNIVALLE	ECCA	el agua tratada del río Cauca.
UNIVERSIDAD DEL VALLE - UNIVALLE	ESTUDIO Y CONTROL DE LA CONTAMINACION AMBIENTAL - ECCA	Optimización del proceso y la calidad del producto del compostaje de biorresiduos de origen municipal en plantas de manejo de residuos sólidos.
UNIVERSIDAD DEL VALLE - UNIVALLE	GRUPO DE SANEAMIENTO AMBIENTAL	Desafío - Democratización de la gobernabilidad de los servicios de agua y saneamiento mediante innovaciones socio-técnicas
UNIVERSIDAD EAFIT	GRUPO DE OPTICA APLICADA	Aberraciones ópticas en haces Laguerre-GAUSSIANOS: corrección y aplicaciones metrológicas.

EAFIT

Contexto



**|CONVENIO ESPECÍFICO DE COLABORACIÓN ENTRE EL INSTITUTO
NACIONAL DE TÉCNICA AEROESPACIAL "ESTEBAN TERRADAS" (ESPAÑA) Y
LA UNIVERSIDAD EAFIT (COLOMBIA)
PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO "CARACTERIZACIÓN DE
ABERRACIONES EN OBJETOS DE FASE PARA EL AIV DE INSTRUMENTOS
ÓPTICOS"**

Método Gerbercht-Saxton

